

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Využití vektorového signálového generátoru a
analyzátoru pro simulaci optického bezvláknového spoje**

**The Utilization of a Vector Signal Generator and Analyzer
for Simulation of Indoor Optical Wireless Links**

2014

Bc. Jiří Pavlovský

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Pavlovský**
Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika
Téma: **Využití vektorového signálového generátoru a analyzátoru pro simulaci optického bezvláknového spoje**
The Utilization of a Vector Signal Generator and Analyzer for Simulation of Indoor Optical Wireless Links

Zásady pro vypracování:

Vektorový signálový generátor RF VSG PXI-5670 a analyzátor RF VSA NI PXI-5661 jsou sofistikované modulární přístroje postavené na technologii PXI. Cílem diplomové práce bude vytvoření modulátoru a demodulátoru pro optický bezvláknový spoj ve viditelné oblasti optického záření. Součástí diplomové práce bude simulace nejpoužívanějších typů modulačních formátů v prostředí LabVIEW.

1. Navrhněte modulátor využívající matici bílých LED, který by umožňoval spolu se signálovým generátorem RF VSG PXI-5670 vytvořit optický vysílač.
2. Navrhněte demodulátor využívající Si fotodetektor, který by umožňoval spolu se signálovým analyzátozem RF VSA NI PXI-5661 vytvořit optický přijímač.
3. Vytvořte optický bezvláknový spoj a simulujte nejpoužívanější typy modulačních formátů s využitím prostředí LabVIEW.
4. Vzájemně porovnejte a vyhodnoťte přenosové vlastnosti optického bezvláknového spoje vzhledem k modulačním formátům.

Seznam doporučené odborné literatury:

AGRAWAL, Govind P. *Fiber-optic Communication System*. Fourth Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2010, 603 s. ISBN 978-0-470-50511-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2014


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 7.5.2013


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Koudelkovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací modulátoru pro matici LED ve viditelném spektru, který v kombinaci s vektorovým generátorem postaveném na modulární technologii PXI umožní vytvořit optický vysílač. Dále se tato práce zabývá návrhem a realizací detektoru, který v kombinaci s vektorovým analyzátozem postaveném na modulární technologii PXI umožní vytvořit optický přijímač. V práci jsou popsány možnosti generování digitálně modulovaného signálu a jejich hlavní parametry. Na vytvořeném optickém bezvláknovém spoji jsou tyto digitální modulace otestovány a následně vyhodnoceny jejich vlastnosti a vhodnost použití pro optické rozhraní.

Klíčová slova

PXI; LED; Visible light communication; modulátor; demodulátor; digitální modulace.

Abstract

This thesis deals with design and implementation of modulator for an array of LED in the visible spectrum, which in combination with vector generator, based on the modular PXI technology, allows the creation of an optical transmitter. Furthermore, thesis deals with the design and implementation of the detector, which in combination with vector analyzer, based on the modular PXI technology, allows the creation of an optical receiver. The thesis describes possibilities of generating digitally modulated signal and their main parameters. These digital modulations are tested on a created optical wireless link and subsequently their properties are evaluated considering to suitability for an optical interface.

Key words

PXI; LED; Visible light communication; modulator; demodulator; digital modulation.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
P	W	Výkon
C	F	Kapacita
U	V	Napětí
I	A	Proud
R	Ω	odpor
A_u	-	Napět'ové zesílení
v_p	bit/s	Přenosová rychlost
v_m	Bd	Modulační rychlost

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
AM	Amplitudová Modulace
ASK	Amplitude Shift Keying
CSK	Color Shift Keying
DE-PCM	Differentialy Encoded PCM
DM	Delta Modulace
D-PCM	Differentialy PCM
EVM	Error
FM	Frequency modulation
FSK	Frequency Shift Keying
LED	Light Emitting Diode
LOS	Line of Sight
MER	modu
NLOS	Non Line of Sight
OOK	On-Off Keying
PAM	Pulse AmplitudeModulation
PCM	Pulse CODE Modulation
PFM	Pulse Frequency Modulation
PM	Phase Modulation
PPM	Pulse Position Modulation
PSK	Phase Shift Keying
PWM	Pulse Width Modulation

PXI	PCI Extensions for Instrumentation
QAM	Qadratura Amplitude modulation
RGB	Red Blue Green
VLC	Visible Light Communications
VPAN	Visible light Personal area Network
VPPM	Variable Pulse Position Modulation

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Optické bezvláknové sítě pro vnitřní prostory	2
2.1	Rozdělení optických bezvláknových sítí.....	3
2.2	IEEE 802.15.7.....	4
2.2.1	Topologie	4
2.2.2	PHY standardu 802.15.7	5
3	Obecný model optického bezvláknového kanálu.....	7
4	Modulace.....	8
4.1	Rozdělení modulací.....	8
4.1.1	Analogové modulace.....	8
4.1.2	Diskrétní nekódované modulace	9
4.1.3	Diskrétní kódované modulace.....	9
4.1.4	Digitální modulace.....	9
4.2	Parametry modulací	10
4.2.1	Modulační rychlost.....	10
4.2.2	Přenosová rychlost	10
4.3	Metody vyhodnocení parametrů digitálních modulací.....	11
4.3.1	IQ diagram	11
4.3.2	Vektorový diagram.....	11
4.3.3	EVM.....	12
4.3.4	MER.....	12
5	Optický vysílač	13
5.1	Signálový generátor RF VSG NI PXI-5670.....	13
5.2	Modulátor.....	14
5.2.1	Návrh matice V.1	14
5.2.2	Návrh modulátoru V.1	15
5.2.3	Návrh matice V.2 a V3.....	18
5.2.4	Návrh modulátoru V.2	19

6	Optický přijímač	24
6.1	Signálový analyzátor RF VSA NI PXI-5661	24
6.2	Fotodiody	25
6.3	Fotodetektor v transimpedančním zapojení	28
7	Měření modulací a jejich vyhodnocení	32
7.1	ASK	33
7.1.1	Výsledky měření pro vzdálenost 15 cm	33
7.1.2	Výsledky měření pro vzdálenost 30 cm	35
7.2	QAM	37
7.2.1	Výsledky měření pro vzdálenost 15cm	37
7.2.2	Výsledky měření pro vzdálenost 30cm	39
8	Závěr	41
	Použitá literatura	42
	Seznam příloh	XLIV

1 Úvod

V dnešní době se setkáváme s potřebou mobility koncových datových zařízení. Nejvíce se rozvíjející odvětví umožňující mobilitu koncových zařízení je pomocí rádiového rozhraní, nepoužívanější a nejlépe cenově dostupnou technologií jsou zařízení rodiny 802.11 v pásmech 2,4 a 5 GHz. Ve vnitřních prostorách se však setkáváme s problémem vzájemného rušení mezi zařízeními vysílajícími na stejných kanálech nebo na kanálech mezi nimiž není dodržen doporučený odstup a snížení propustnosti takto vytvořených sítí. Dalším negativem u takto vytvořených sítí je možnost odposlechu a útoku na danou síť z prostor, které jsou signálem pokryty z důvodu vlastností šíření rádiových vln (místnost nad, pod nebo vedle pokrývaného prostoru). Tyto problémy by mohly vyřešit sítě využívající optické rozhraní.

S pokrokem technologie výroby LED diod došlo k rozšíření jejich funkce z funkce signalizačních kontrolky na zařízeních k jejich využití jako světelných zdrojů v osvětlovacích prvcích interiérů a exteriérů. Vznikla myšlenka využít LED v osvětlovacích prvcích nejen pro osvětlování prostoru, ale také jako optické rozhraní určené pro datovou komunikaci. Komunikace pomocí světla ve viditelném spektru přenáší data modulováním vyzařovaného výkonu světla a využívá tak nedokonalosti lidského oka, které nedokáže zaznamenat takovéto rychlé děje.

Hlavní částí této diplomové práce, byl návrh a konstrukce optického vysílače a přijímače pro komunikace ve viditelném spektru. Na takto vytvořeném optickém spoji využívajícím pro přenos bílé světlo, otestovat vícecestavové digitální modulace a zjistit vhodnost použití pro toto přenosové médium.

2 Optické bezvláknové sítě pro vnitřní prostory

Pro bezdrátovou komunikaci nabízí světlo několik významných výhod před rádiovými vlnami. Světelné zdroje a detektory mají vysokou rychlost odezvy za relativně nízké pořizovací náklady. Světlo nabízí prakticky neomezenou šířku pásma, kterou je možno použít kdekoli na světě.

Infračervené světlo a světlo ve viditelné oblasti vykazuje obdobné chování, je pohlcováno tmavými předměty, od světlých předmětů se difuzně odráží a lesklé předměty je odráží směrově. Světelné záření je schopno proniknout přes sklo a jiné čiré materiály, kdežto zdi a jiné neprůhledné materiály nepronikne, tato vlastnost šíření světla prostorem umožňuje pokrýt signálem pouze konkrétní prostor. Toto chování optického signálu umožňuje zvýšit bezpečnost přenosu proti běžným odposlechům a vzájemnému rušení mezi sítěmi pokrývajících různé místnosti. Takto vytvořené optické bezvláknové sítě mohou dosáhnout celkově velké přenosové kapacity a může dojít k zjednodušení konstrukce, protože vysílání v jednotlivých místnostech nemusí být mezi sebou koordinováno. V případě využití intenzitní modulace s přímou detekcí s využitím velkoplošného detektoru dochází k eliminaci vlivu vícecestného šíření signálu. Nevýhodu bezvláknových optických sítí můžeme vidět v tom, že komunikace mezi optickými bezvláknovými přístupovými body v jednotlivých místnostech musí být realizována pomocí páteřní sítě. Dalším problémem může být vliv okolního světla (slunce, žárovky, zářivky), které způsobuje šum na optickém přijímači. Vlastnosti rádiových a optických bezvláknových sítí jsou porovnány v tab. 2.1[1].

Tabulka 2.1: Srovnání mezi rádiovými a optickými systémy

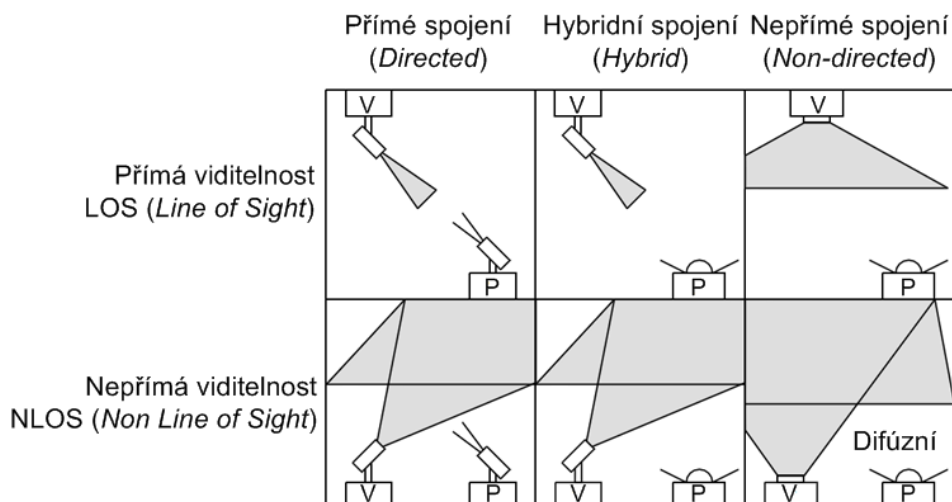
Vlastnost média	Rádiové sítě	Optické bezvláknové sítě
Regulované pásmo	ANO	NE
Šíření skrze zdi	ANO	NE
Vícecestné šíření	ANO	NE
Dominantní šum	Okolí sítě	Okolní světlo
Reprezentace vstupního signálu	Amplituda	Výkon

Rádiové a optické rozhraní jsou vzájemně se doplňující přenosová média, která mohou mít pro konkrétní aplikace své výhody. Rádiové rozhraní je uplatňováno tam, kde je za potřeby maximální mobilita koncového uživatele a kde je nutné umožnit komunikaci skrze stěny a na větší vzdálenosti.

2.1 Rozdělení optických bezvláknových sítí

Optické bezvláknové datové sítě pro vnitřní prostory jsou rozděleny podle kritérií návrhu do několika variant. Prvním kritériem je viditelnost mezi přijímačem a vysílačem. Optické bezvláknové systémy s přímou viditelností jsou označovány jako LOS a bez přímé viditelnosti NLOS, koncepce je znázorněna na obr. 2.1. NLOS varianta využívá odrazivosti zdi nebo předmětů umístěných v daném prostoru, které difúzně odrážejí světlo. Takto navržené systémy jsou označovány jako difúzní. NLOS, respektive difúzní systémy, nabízejí jednu výhodu oproti systémům s přímou viditelností a to funkčnost bez ohledu na procházející osoby v daném prostoru či jiné překážky. Nevýhodou takto koncipovaných systémů je snížená přenosová kapacita vlivem komplikované dráhy šíření signálu mezi vysílačem a přijímačem, která způsobuje rozšíření pulzu a mezisymbolovou interferenci. Maximální přenosová rychlost by mohla dosahovat 25 Mbps [2].

Směrovost vysílače a přijímače je dalším kritériem rozdělení optických bezvláknových sítí. Přímé spojení vysílače a přijímače vyžaduje směrovost obou prvků spoje. U nepřímého spojení se využívá velkého vyzařovacího úhlu vysílače a velkého přijímacího úhlu přijímače, tato koncepce spojení snižuje nároky na precizní zamíření vysílače a přijímače. Nevýhodou této koncepce je vyšší energetická náročnost a vyšší příjem šumu a okolního parazitního světla oproti přímému spojení. Mezi nejdůležitější požadavky na optické bezvláknové datové sítě pro vnitřní prostory patří zajištění mobility koncových účastníků. V takovém případě je daleko výhodnější využít nepřímého spojení. Kompromisem mezi přímým a nepřímým spojením je hybridní spojení kombinující vysílače a přijímače s různým stupněm směrovosti (obráz. 2.1) [3].



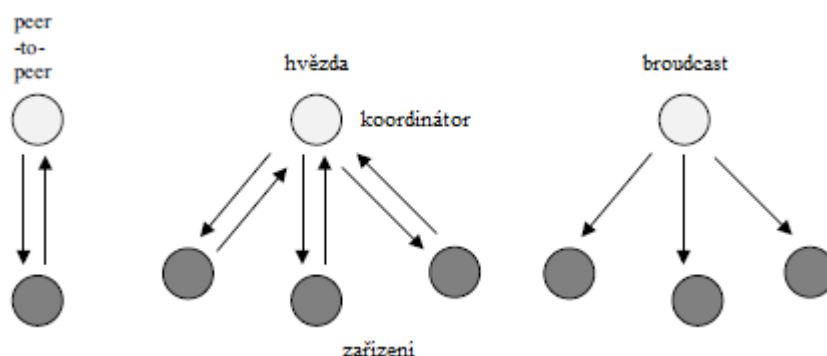
Obrázek 2.1: Rozdělení optické bezvláknové sítě pro vnitřní prostory [3]

2.2 IEEE 802.15.7

Optické komunikace ve viditelném spektru přenáší data modulací intenzity světla rychlostí, která je pro lidské oko nepostřehnutelná. Zdroje světla používané pro tuto komunikaci jsou LED a laserové diody. VLC slučuje osvětlení a datové komunikace v aplikacích, jako je osvětlení prostorů, světelné tabule, pouliční osvětlení, vozidla a dopravní signalizace. Tento standard popisuje použití VLC pro bezdrátové osobní sítě [4].

2.2.1 Topologie

Standard IEEE 802.15.7 určuje tři topologie VLC osobních sítí. Řízení komunikace je typu master/slave, kde je master označován jako koordinátor a slave jako zařízení.



Obrázek 2.2: topologie standardu IEEE 802.15.7

- **Topologie peer-to-peer**

Základní struktura topologie je znázorněna na obr. 2.2. V topologii peer-to-peer, je každé zařízení schopno komunikovat s jiným zařízením v rámci své oblasti pokrytí. V topologii peer-to-peer, jedno ze zařízení působí jako koordinátor. Zařízení se stane koordinátorem komunikace například tím, že je prvním zařízením pro komunikaci na kanálu [4].

- **Topologie hvězda**

Základní struktura hvězdicové topologie je znázorněna na obr. 2.2. Všechny sítě topologie hvězda pracují nezávisle na všech ostatních sítích. Toho je dosaženo výběrem identifikátoru VPAN, který není v daný čas používán jinou sítí v rámci pokryté oblasti. Jakmile je zvolen identifikátor VPAN, koordinátor umožní jiným zařízením připojení do dané sítě [4].

- **Topologie broadcast**

Základní struktura broadcast topologie je znázorněna na obr. 2.2. Zařízení v broadcast režimu, vysílá signál na další zařízení bez vytváření sítě. Komunikace je jednosměrná a není nutná cílová adresa [4].

2.2.2 PHY standardu 802.15.7

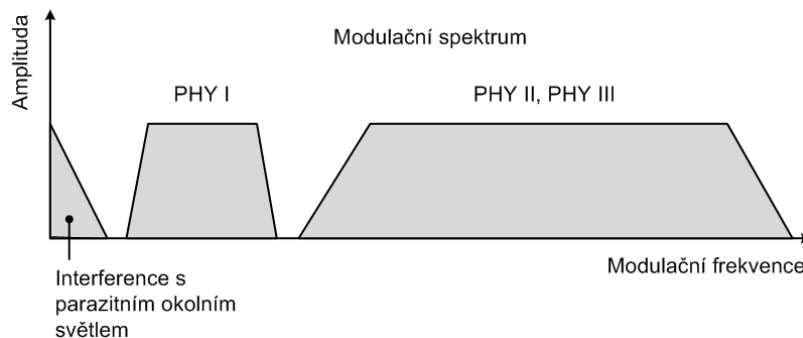
PHY je zodpovědná za následující úkony:

- Aktivace a deaktivace VLC vysílače
- Volba kanálu
- Vysílání a příjem dat
- Oprava chyb
- Synchronizace
- WQI přijatých rámců

Standard IEEE 802.15.7 definuje 3 typy fyzické vrstvy (obr. 2.3):

- PHY I: tento typ je určen pro případné nasazení ve venkovních prostorech s definovanou nízkou přenosovou rychlostí (desítky až stovky kbps). Využívá se modulace OOK nebo VPPM,
- PHY II: tento typ je určen pro vnitřní použití s definovanou přenosovou rychlostí v řádu desítek Mbps. Využívá se modulace OOK nebo VPPM,

- PHY III: tento typ je určen pro vnitřní prostory s definovanou technologií přenosu CSK s přenosovými rychlostmi v řádu desítek Mbps.



Obrázek 2.3: Frekvenční rozdělení fyzické vrstvy

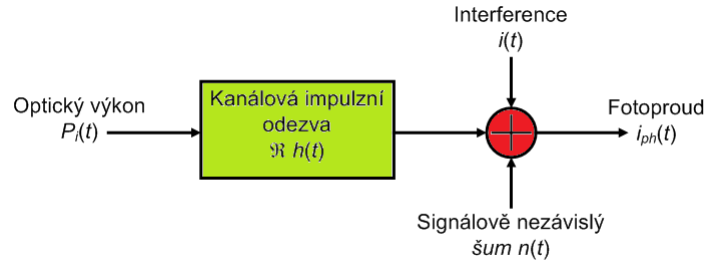
Standard IEEE 802.15.7 řeší problematiku kolísání optického výkonu při absenci přenášených dat, případně při přenosu dlouhého řetězce log. 0. Řešení nabízí v podobě vložení variabilní klidové části do přenosového rámce (*Idle Pattern*), aby nedocházelo k výrazné změně optického výkonu. Řešení klidové části může být ve formě *In-Band* nebo *Out-Band* ve smyslu použitého modulačního spektra. *In-Band* řešení nevyžaduje žádnou změnu v taktovací frekvenci a lze jej kontrolovat na přijímací části. *Out-Band* řešení je v podobě typicky mnohem menších taktovacích frekvencí a variabilitě výkonu zdroje optického záření (včetně úrovně optického výkonu v podobě stejnosměrného proudu). Standard také umožňuje kompenzaci vlivu posloupnosti log. 1 a log. 0 při přenosu dat opět formou vložení klidové části[4].

Rozdíl v řešení kolísání optického výkonu také závisí na použité modulaci:

- OOK: řešení je v podobě vložení datového rámce za účelem nastavení průměrného optického výkonu. Tento proces rozdělí datový rámec na podrámce, které předchází resynchronizační pole (podpora časové synchronizace). Rozdělení je provedeno, až když je vypočteno FCS (*Frame Check Sequence*) a použito FEC (*Forward Error Correction*) [4].
- VPPM: modulační formát je adaptován proti změně optického výkonu, protože amplituda pulzu je vždy konstantní a případná korekce se provádí pomocí změny šířky pulzu. VPPM v sobě sdružuje PPM modulaci a PWM řešení optického výkonu [4].

3 Obecný model optického bezvláknového kanálu

Obecný model optického bezvláknového kanálu s intenzitní modulací a přímou detekcí je uveden na obr. 3.1. Přenášený signál je vyjádřen v podobě okamžitého výkonu zdroje optického záření $P_i(t)$. Výsledný přijatý signál $i_{ph}(t)$ odpovídá okamžitému fotoproudu fotodiody v přijímači. Přenos optického bezvláknového kanálu lze modelovat jako pásmový, lineární a s okamžitou hodnotou vstupního optického výkonu $P_i(t)$, nvýstupním fotoproudem $i_{ph}(t)$ a impulzní odezvou systému $h(t)$ [5].



Obrázek 3.1: Obecný model optického bezvláknového kanálu

Vyjádření modelu optického bezvláknového kanálu [11]:

$$i_{ph}(t) = \Re P_i(t) \otimes h(t) + n(t) + i(t) \quad (3.1)$$

Symbol \otimes označuje konvoluci a \Re je citlivost fotodetektoru. Rovnice (3.1) vyjadřuje optický bezvláknový kanál jako jednoduchý konvenční lineární kanál s aditivním šumem. Optické bezvláknové systémy se liší od běžných elektrických systémů, protože je na vstup optického bezvláknového kanálu přiveden okamžitý optický výkon zdroje optického záření, a jeho velikost bude vždy kladná.

$$P_i(t) \geq 0 \quad (3.2)$$

průměrný přenášený optický výkon P_t lze vyjádřit:

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T P_i(t) dt \quad (3.3)$$

průměrný přijatý optický výkon fotodiody:

$$P_d = P_t \cdot H_d(0) \text{ kde } H_d(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (3.4)$$

4 Modulace

Modulace je nelineární proces, při kterém se mění charakter nosného signálu pomocí modulačního signálu. S vývojem potřeb komunikačních technologií, vzniklo velké množství modulačních formátů. Modulace lze rozdělit z hlediska historického vývoje od nejstarších po nejnovější a to na analogové, diskrétní nekódované, diskrétní kódované a digitální. Základní rozdělení modulací je znázorněno v tab.3.1 [6].

Tabulka 4.1: Základní rozdělení modulací

Modulace			
S nosnými vlnami		V základním pásmu	
Analogové	Digitální	Diskrétní kódované	Diskrétní nekódované
AM	M-ASK	PCM	PAM
FM	M-FSK	D-PCM	PPM
PM	M-PSK	AD-PCM	PWM
	M-QAM	DE- PCM	PFM
	M-AM	DM	
	M-PM	ADM	

4.1 Rozdělení modulací

4.1.1 Analogové modulace

Analogové modulace jsou takové modulace, kde analogový modulační signál přímo ovlivňuje jeden z parametrů nosné vlny. Mezi parametry nosné vlny, které mohou být při modulaci ovlivňovány, patří amplituda, frekvence a fáze, pak dostáváme AM, FM a PM. U amplitudové modulace je modulovaný signál složen z nosné vlny, součtového a rozdílového pásma. S potlačením jednoho z postraních pásem nebo nosné vlny dostáváme další varianty této modulace[6].

4.1.2 Diskrétní nekódované modulace

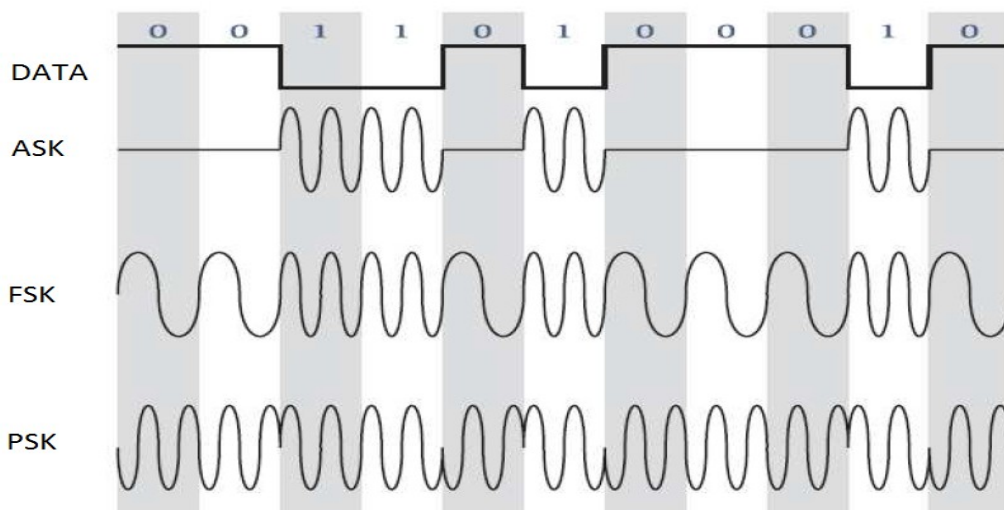
Diskrétní modulace jsou nazývány také jako modulace impulzní, kde modulační signál ovlivňuje jeden z parametrů nosného impulzního signálu, amplitudu, fázi, šířku impulsu, nebo frekvenci. V případě že je ovlivňovaná amplituda nosného impulzního signálu dostáváme PAM, která tvoří základ pro modulace kódované. Jestliže modulační signál ovlivňuje fázi nosného impulzního signálu vzniklý modulační produkt je PPM, pokud se v závislosti na velikosti vstupního modulačního signálu mění šířka pulzu nosného signálu, dostáváme PWM a v případě ovlivňování frekvence PFM [6].

4.1.3 Diskrétní kódované modulace

Základem pro tyto modulace je PAM, která prochází dalšími stupni zpracování a to kvantování a následně kódování. Při kvantování dochází k diskretizaci signálu na konečný počet hodnot a při kódování je konkrétní kvantovací úroveň vyjádřena kódovým slovem, většinou vyjádřeným v binární soustavě. Základním typem těchto modulací je PCM a od ní byly odvozeny D-PCM, AD-PCM a další[6].

4.1.4 Digitální modulace

Zdrojem modulačního signálu je bitová posloupnost, která jako u všech předešlých modulací může ovlivňovat amplitudu, frekvenci nebo fázi nosného signálu. Modulace kde změna modulovaného signálu vyjadřuje jen jeden bit informace (log.1 nebo log.0) jsou označovány jako klíčování a jsou to ASK, FSK, PSK a jejich průběhy jsou zobrazeny na obr.3.1.



Obrázek 4.1: Základní typy klíčování

S potřebou zvýšit přenosovou kapacitu, vedl vývoj k použití vícecestavových modulací, kde je v jedné změně modulovaného signálu přenesena informace nejméně 2 bitů signálu modulačního. Příkladem takovéto modulace může být Q-PSK modulace, která díky použití čtyř různých fázových posuvů může kódovat dva bity na symbol. Varianty klíčovaných modulací jsou uvedeny v tab. 3.2 [6].

Tabulka 4.2: Rozdělení digitálních modulací

Digitální modulace			
S konstantní obálkou		S proměnnou obálkou	
FSK	PSK	M-ASK	M-QAM
BFSK M-FSK	B-PSK Q-PSK M-PSK OQ-PSK $\pi/4$ -QPSK		

4.2 Parametry modulací

4.2.1 Modulační rychlost

Modulační rychlost v_m je parametr, který nám udává počet symbolů přenesený za sekundu neboli počet změn nosné vlny. Jednotkou modulační rychlosti je Baud [Bd] a je vyjádřena jako převrácená hodnota doby trvání signálového prvku a (4.1)[10].

$$v_m = \frac{1}{a} [\text{Bd}]. \quad (4.1)$$

4.2.2 Přenosová rychlost

Přenosová rychlost udává počet bitů přenesených za sekundu. Jednotkou přenosové rychlosti je bit/s. Přenosová rychlost v_p je vyjádřena k modulační rychlosti podle vzorce (4.2) kde m je počet stavů modulace.

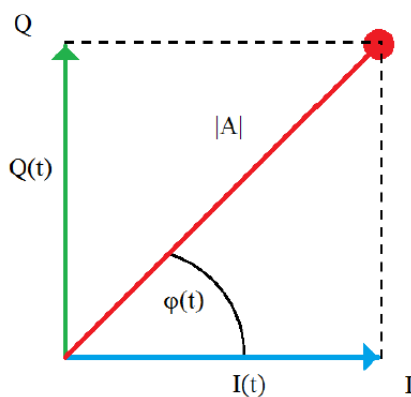
$$v_p = v_m \cdot \log_2 m. \quad (4.2)$$

Ze vztahu (4.2) vyplývá, že při použití vícecestavových modulací můžeme dosáhnout při stejné modulační rychlosti vyšší rychlosti přenosové nebo při zachování stejné přenosové rychlosti docílíme snížení rychlosti modulační [10].

4.3 Metody vyhodnocení parametrů digitálních modulací

4.3.1 IQ diagram

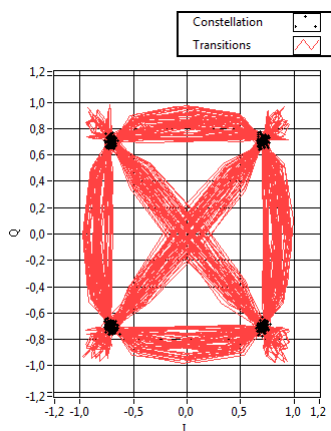
Digitální modulace lze zobrazit pomocí IQ diagramu a to díky skutečnosti, že vysokofrekvenční signál o konstantní úhlové frekvenci ω a o proměnné fázi φ a amplitudě (A) je možné zobrazit v komplexní rovině jako fázor, který je složený ze dvou složek - $I(t)$ (In-phase) a $Q(t)$ (Quadrature-phase). Obě složky mají shodné frekvence, ale jsou fázově posunuty o 90° (viz. obr.4.2) [13]



Obrázek 4.2: IQ diagram.

4.3.2 Vektorový diagram

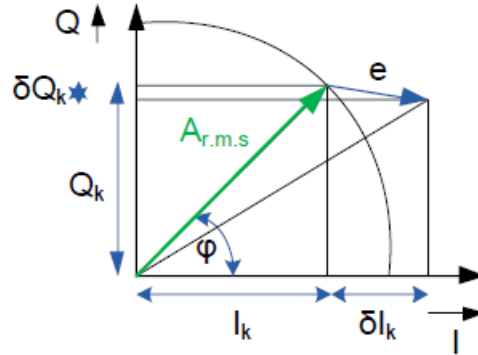
Vektorový diagram vznikne zobrazením výslednic I a Q modulačních složek, a jsou na něm zobrazovány jak jednotlivé stavy modulace, tak i přechody mezi nimi.



Obrázek 4.3: Reálný vektorový diagram QAM modulace

4.3.3 EVM

Princip měření vychází z porovnávání aktuálně naměřených hodnot amplitudy a fáze přenášeného signálu s referenčními hodnotami průběžně počítanými na základě znalosti parametrů a vlastností daného modulačního systému. Používá se pro měření kvalitativních parametrů vysílače nebo přijímače. EVM vyjadřuje střední kvadratickou hodnotu chybných hodnot jednotlivých stavů. [13]



Obrázek 4.4: Grafické zobrazení EVM [7]

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\partial I_k^2 + \partial Q_k^2)}{S_{max}^2}} \cdot 100[\%] \quad (4.3)$$

4.3.4 MER

MER nám udává, podobný údaj jako je odstup signálu/šum u analogových systémů, v digitálně modulovaných signálech. Vyjadřuje poměr součtu čtverců amplitud přijatého signálu k velikosti součtu amplitud ideálního signálu. MER se obvykle vyjadřuje jednotkou dB [7].

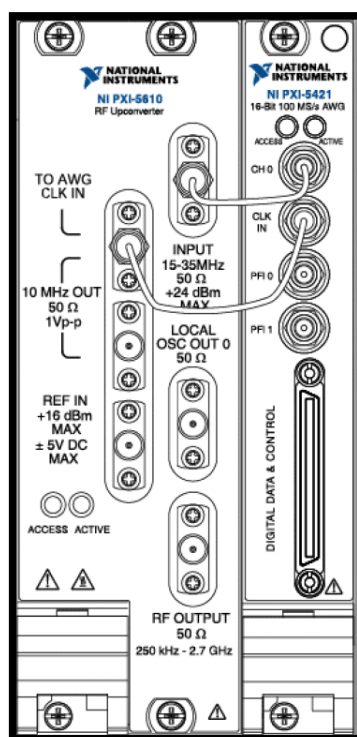
$$MER = 20 \log \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (\partial I_k^2 + \partial Q_k^2)}} [dB] \quad (4.4)$$

5 Optický vysílač

5.1 Signálový generátor RF VSG NI PXI-5670

Vysílací jednotka je složena ze dvou částí upkonvertor (PXI-5610) a generátoru libovolného průběhu (PXI- 5421). Jsou-li používány obě měřicí karty současně podle zapojení na obr. 5.1, nazývá se tento měřicí celek PXI-5670 generátor signálu. Generátor libovolného průběhu pracuje s maximální vzorkovací frekvencí 100MS/s, který pracuje s diskretním IQ průběhem generovým pomocí LabVIEW. S vývojovým prostředím LabVIEW doplněným o rozšiřující knihovnu Modulation Toolkit lze s využitím tohoto PXI modulu generovat potřebné testovací signály. RF vektor signálový generátor NI PXI-5670 pracuje s rozlišením 16 bitů a hloubkou paměti až 512 MB a reálnou šířkou pásma 20 MHz. S využitím digitálního upkonvertoru lze generovat signály v pásmu 250 kHz až 2,7 GHz s libovolným modulačním schématem.

[12]



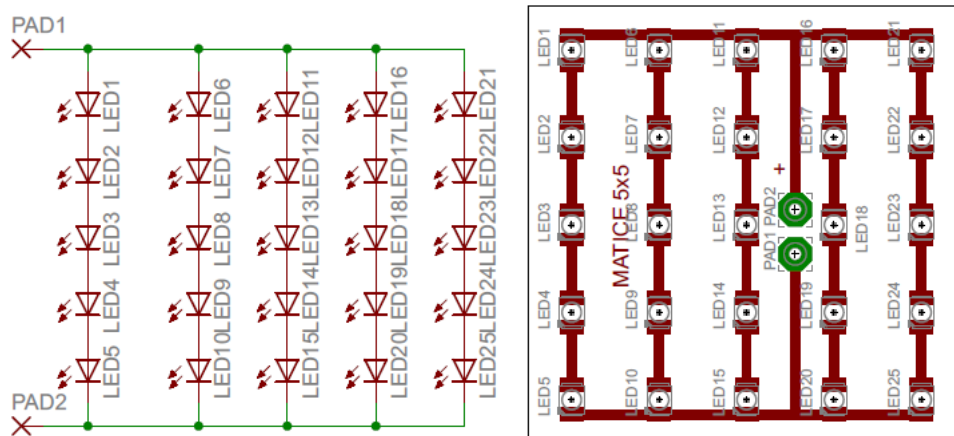
Obrázek 5.1:Zapojení generátoru NI PXI-5670[12]

5.2 Modulátor

Jedním s úkolů bylo navrhnout optický modulátor, který umožní s vektorovým generátorem vytvořit optický bezvláknový vysílač, a kde bude jako zdroj vysílaného optického signálu použita matice bílých LED. Z použití digitálních modulací obsahujících nosnou vlnu vyplynula koncepce modulátoru. Aby se co nejlépe využila lineární část PI charakteristiky LED, ubíral se návrh modulátoru, k nastavení výstupního klidového proudu tekoucí maticí bílých LED do poloviny maximální hodnoty. Tak že v klidovém stavu, kdy nebudou vysílány žádné informace, bude matice svítit konstantním jasnem.

5.2.1 Návrh matice V.1

První část konstrukce spočívala v návrhu a konstrukci matice pro použité LED. Byla navržena matice 5x5 LED, kde byla vzdálenost mezi jednotlivými diodami 10mm. Schéma zapojení a plošný spoj je na obr.5.2. Parametry matice nám definují vlastnosti modulátoru pro jeho návrh.



Obrázek 5.2: Schéma zapojení a plošný spoj matice

Katalogové parametry LED PLCC2LW3CT

- V_F : 3,5 V
- I_F : 30 mA
- $I_{F\text{ pulz}}$: 100 mA
- Vyzařovací úhel 120°

Parametry matice

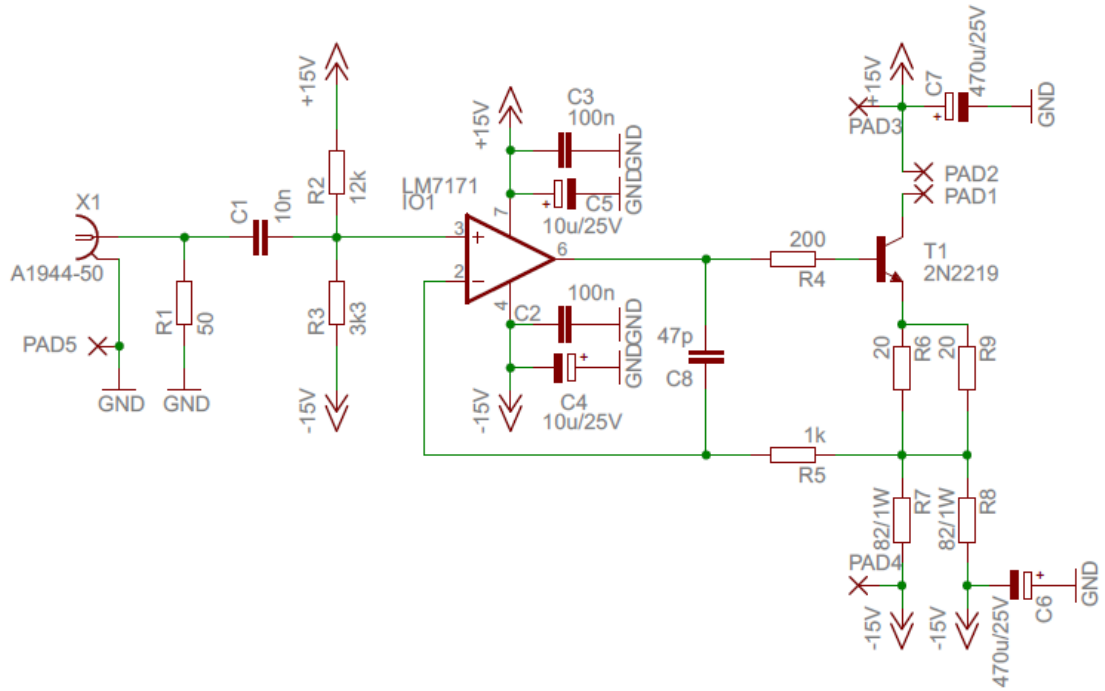
- $V_F = 17,5 \text{ V}$
- $I_F = 150 \text{ mA}$
- $I_{F \text{ max}} = 250 \text{ mA}$
- $P_0 = 2,6 \text{ W}$

5.2.2 Návrh modulátoru V.1

Z parametrů navržené matice dostáváme vstupní parametry pro návrh modulátoru. Klidový výstupní proud 150mA, napětí na matice 17,5 V, maximální výstupní proud 250mA. Z důvodu stabilizace tepelné stabilizace vzhledem ke změně parametrů zahrávajících se LED jsem zvolil zapojení s operačním zesilovačem se zápornou napěťovou zpětnou vazbou. Základem modulátoru byl zvolen rychlý operační zesilovač s výkonným proudovým výstupem LM7171 posílený bipolárním tranzistorem 2N2219, který je vyhovující i z důvodu možnosti použití napájecího napětí $\pm 15 \text{ V}$. Na obr. 5.3 je schéma zapojení navrženého modulátoru.

Parametry operačního zesilovače LM7171[8]

- Rychlost přeběhu: $4100 \text{ V}/\mu\text{s}$
- Šířka pásma pro $A_u=1$: 200 MHz
- Napájecí proud: $6,5 \text{ mA}$
- Zisk otevřené smyčky: 85 dB
- Výstupní proud: 100 mA
- Napájecí napětí: $\pm 15 \text{ V}$ a $\pm 5 \text{ V}$



Obrázek 5.3: Schéma zapojení modulátoru V.1

Nastavení klidového výstupního proudu (I_{kl}) je realizováno pomocí napěťového děliče na neinvertujícím vstupu tvořeného rezistory R_2 a R_3 a napěťové zpětné vazbě z paralelní dvojice R_7 , R_8 , zde je využita vlastnost OZ, který se snaží docílit nulového rozdílového napětí mezi svými vstupy (5.1), (5.2). Z důvodu vysoké vstupní impedance vstupů OZ, může být k návrhu přistupováno jako k nezátíženému děliči.

$$U_{R3} = \frac{U_{cc+} - U_{cc-}}{R_2 + R_3} \cdot R_3 = \frac{30}{15300} \cdot 3300 = 6,47 \text{ V.} \quad (5.1)$$

$$U_{R3} = U_{R7||R8}. \quad (5.2)$$

$$I_{kl} = \frac{U_{R3}}{R_7||R_8} = \frac{6,47}{41} = 157 \text{ mA.} \quad (5.3)$$

Hodnota klidového výstupního proudu je nastavena použitými součástkami na 157 mA (5.3).

Vstupní impedance modulátoru je určena obvodu pro střídavé složky je dána jako paralelní kombinace rezistorů R_1 , R_2 , R_3 (5.4).

$$Z_{vst} = \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3}} = \frac{1}{0,0204} = 49 \Omega \quad (5.4)$$

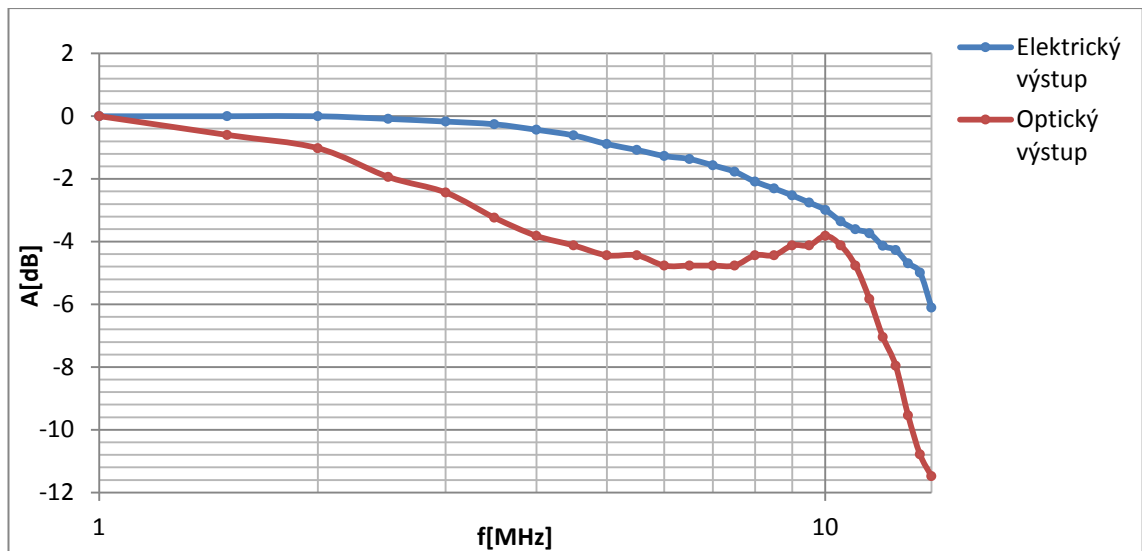
Z důvodu použití vstupního děliče pro nastavení klidového výstupního proudu modulátoru je nutné stejnosměrně oddělit vstup modulátoru od budícího zařízení. Tuto funkci realizuje v zapojení kondenzátor C1 zařazený do vstupu modulátoru mezi přizpůsobovací odpor R1 a dělič. Kapacita C1 spolu se vstupním děličem tvoří horní propust s dolní přenášenou frekvencí vypočtenou dle vzorce (5.5).

$$F_d = \frac{1}{2\pi \cdot R2 || R3 \cdot C1} = \frac{1}{0,162624 \cdot 10^{-3}} = 6149 \text{ Hz} \quad (5.5)$$

Rezistor R4 plní v zapojení funkci tlumícího odporu a ochranného odporu báze a v kombinaci s kondenzátorem C8 a rezistorem R5 zajišťuje stabilitu obvodu.

Blokování napájecího napětí v blízkosti vývodů pouzdra OZ, bylo realizováno kombinací tantalových a keramických kondenzátorů dle doporučení výrobce 100nF, 10μF. V blízkosti přívodů na plošném spoji modulátoru, jsou umístěny filtrační kondenzátory 470μ/25V.

Po oživení modulátoru byla změřena výstupní frekvenční charakteristika obvodu (obr.5.4), kde optický výstup klesá pod na -3dB při 3,5 MHz a obvod při 10 MHz.



Obrázek 5.4: Frekvenční charakteristika modulátoru

5.2.3 Návrh matice V.2 a V3

Z důvodu použití výkonnějších typů LED v pouzdrech PLCC4 a PLCC6 bylo potřeba vytvořit nové matice. Jedná se o dva typy LED firmy OSRAM Opto Semikonduktor. Schéma zapojení je stejné pro oba dva typy používaných LED (obr.5.5). Při tvorbě matice bylo počítáno s odděleným napájením led a řídicího obvodu, proto je na plošném spoji matice umístěn i filtrační kondenzátor. Matice V.1 se k modulátoru připojovala pomocí dvou vodičů, u matice V.2 a V.3 je osazena konektorem, který se na modulátor pouze nasune(viz. Obr.5.6).

Power TOPLED Plus

- modrá:LDG5AP-4M4N-35-1
- teplá bílá:LCWG5GP-FYGY-5R8T
- studená bílá: LUW G5GP-GXHY-5C8E

Společné parametry:

- V_F : 2,8-3,8 V
- I_F : 30-200 mA
- Pouzdro: PLCC4

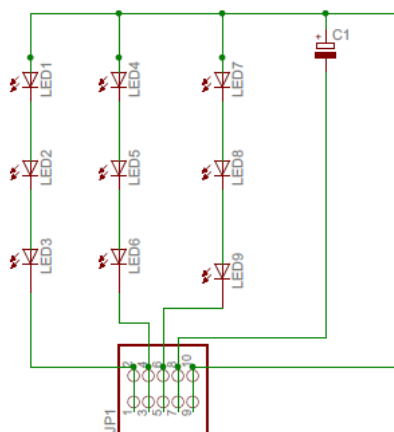
Advanced Power TOPLED

- modrá: LB G6SP-V2BB-35-1
- teplá bílá: LCW G6CP-DAFA-4V9X
- studená bílá: LW G6SP-EAFA-JKQL-1

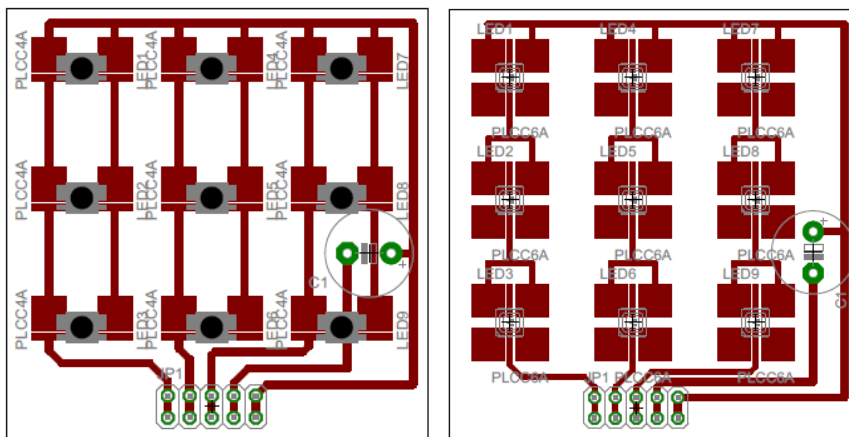
Společné parametry:

- V_F : 2,9-4,1 V
- I_F : 30-250 mA
- Pouzdro: PLCC6

Z důvodu vyššího proudového odběru použitých led diod došlo k rozdělení matice, kde je každá sériová trojice buzena samostatně. V případě, že by byla matice buzena jako celek z jednoho obvodu musel by se použít výkonnější tranzistor na výstupu operačního zesilovače a to by přineslo zhoršení dynamických vlastností obvodu.



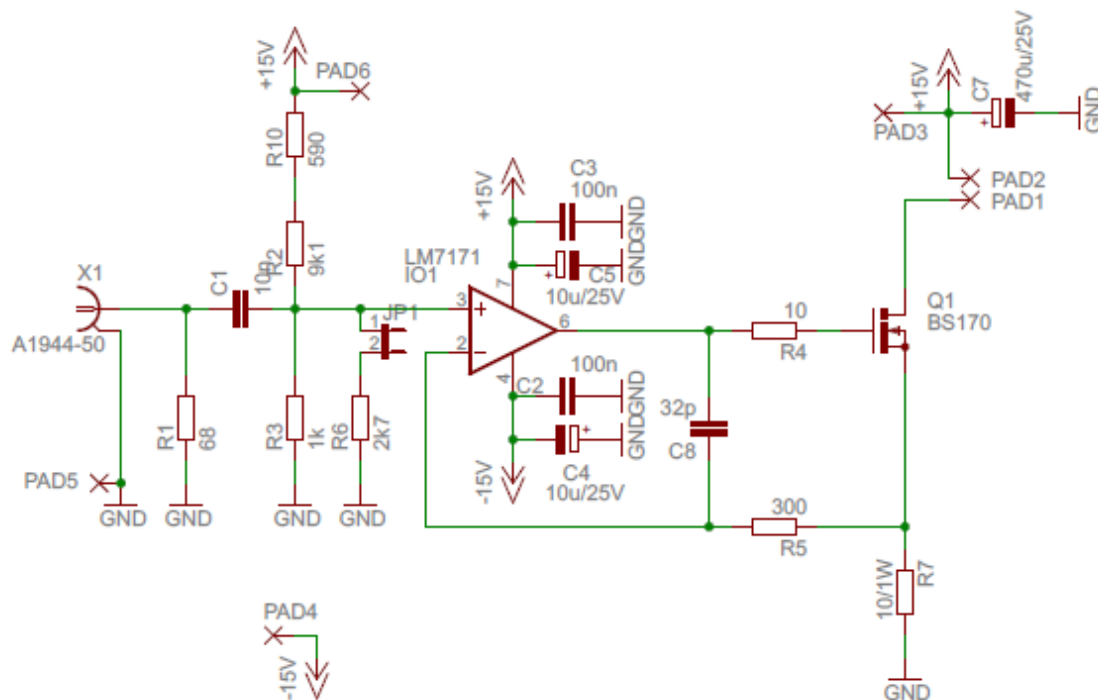
Obrázek 5.5: Schéma zapojení matice $V.2$ a $V.3$



Obrázek 5.6: Plošné spoje mati V.2 a V.3

5.2.4 Návrh modulátoru V.2

Tento modulátor vznikl k maticím V.2 a V.3, základ modulátoru je stejně jako u V.1 v operačním zesilovači LM7171, jehož výstup je posílen v tomto případě unipolárním tranzistorem BS170. Kvůli vyššímu proudovému odběru byl modulátor rozdělen na tři samostatné větve. Dále bylo toto zapojení rozšířeno o možnost nastavení dvou klidových úrovní výstupního proudu na 100 mA a 140 mA, a to pomocí jumperu JP1 (viz. obr.5.7).



Obrázek 5.7: Schéma zapojení jedné větve modulátoru

Výpočet klidového proudu pro rozpojený jumper JP1 (5.6)

$$U_{R3} = \frac{U_{cc}}{R2 + R3 + R10} \cdot R3 = \frac{15}{10690} \cdot 1000 = 1,403 \text{ V}$$

$$U_{R3} = U_{R7} \quad (5.6)$$

$$I_{kl} = \frac{U_{R3}}{R7} = \frac{1,403}{10} = 140,3 \text{ mA}$$

Výpočet klidového proudu pro zapojený jumper JP()

$$U_{R3} = \frac{U_{cc}}{R2 + R3||R6 + R10} \cdot R3 = \frac{15}{10420} \cdot 730 = 1,05 \text{ V}$$

$$U_{R3||R6} = U_{R7} \quad (6.7)$$

$$I_{kl} = \frac{U_{R3||R6}}{R7} = \frac{1,05}{10} = 105 \text{ mA}$$

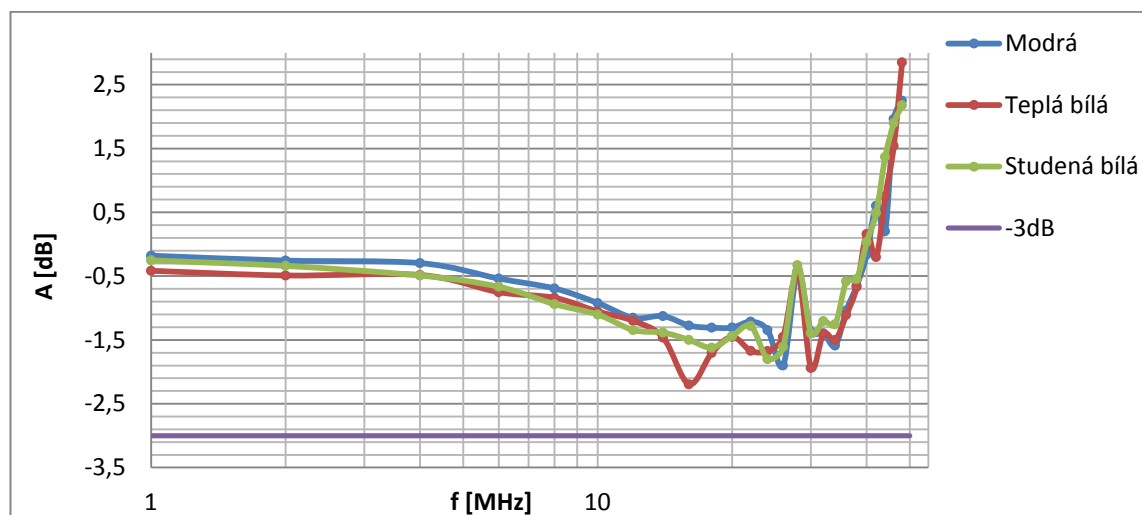
Výpočet vstupní impedance u tohoto modulátoru je složitější než u jednoho obvodu. Protože se na ní podílí všechny tři obvody(5.8).

$$Z_{vst} = \frac{1}{\frac{1}{R1} + 3 \cdot \frac{1}{R2 + R10} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R6}} = \frac{1}{0,0191} = 52,3 \, \Omega \quad (5.8)$$

Dolní přenášenou frekvenci vstupního obvodu vypočteme podle vzorce (5.9).

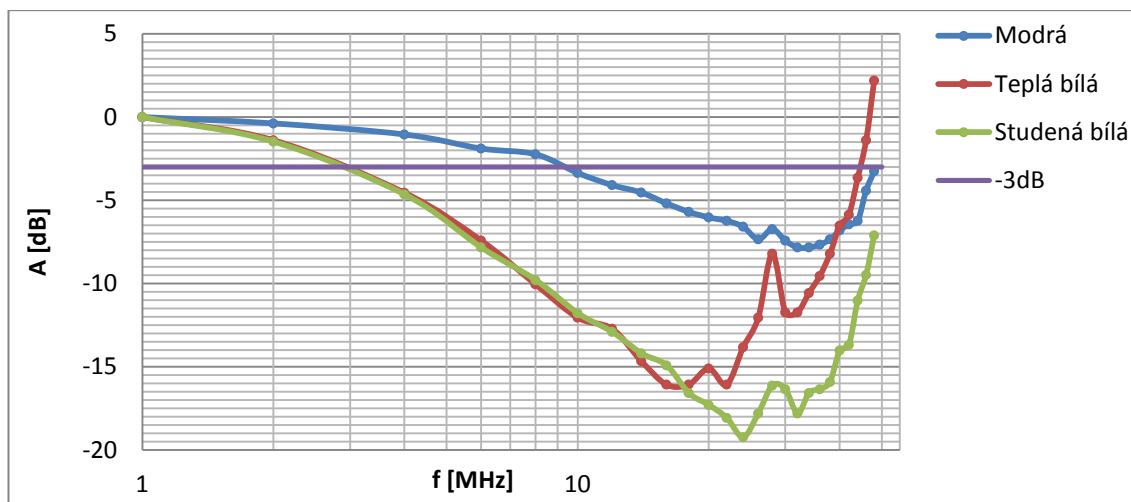
$$F_d = \frac{1}{2\pi \cdot (R2 + R10) \parallel R3 \parallel R6 \cdot C1} = \frac{1}{42,64 \cdot 10^{-6}} = 23453 \, Hz \quad (5.9)$$

Ostatní součástky stejné funkce jako u modulátoru V.1. Po oživení modulátoru a odstranění příčin kmitání obvodu byly změřeny frekvenční charakteristiky, pro jednotlivé typy LED.

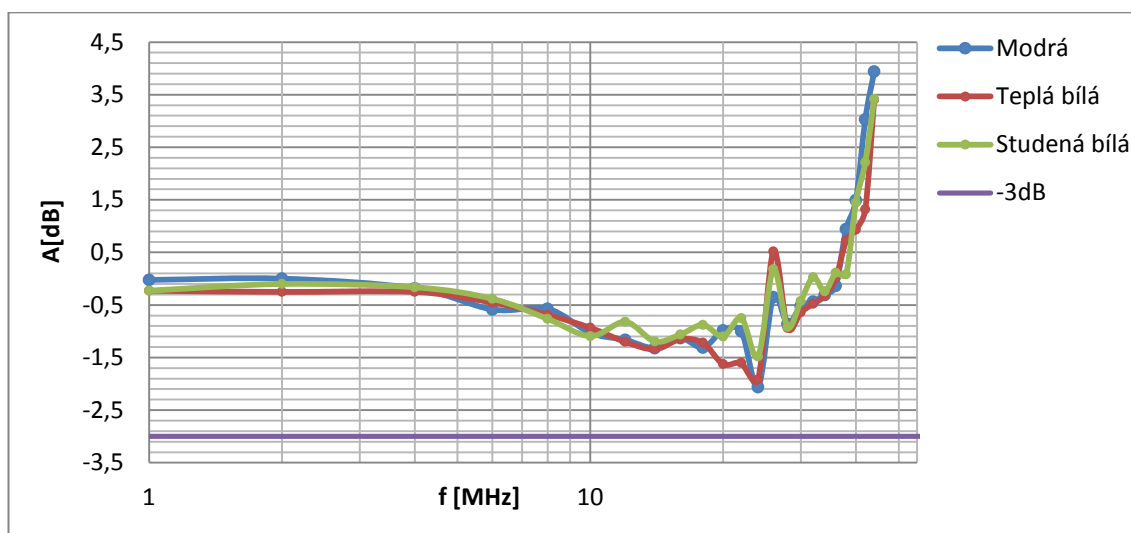


Obrázek 5.8: Frekvenční charakteristika modulátoru s Power TOPLED Plus

Na obrázcích 5.8 a 5.10 je frekvenční charakteristiky modulátoru pro jednotlivé typy LED, je z nich zřejmé, že frekvenční charakteristika nemá standardní průběh a dochází u něj k rezonančnímu převýšení, které vede kolem 46MHz u Advanced Power TOPLED a kolem 48 MHz u Power TOPLED k rozkmitání obvodu a jeho nepoužitelnosti pro buzení LED.

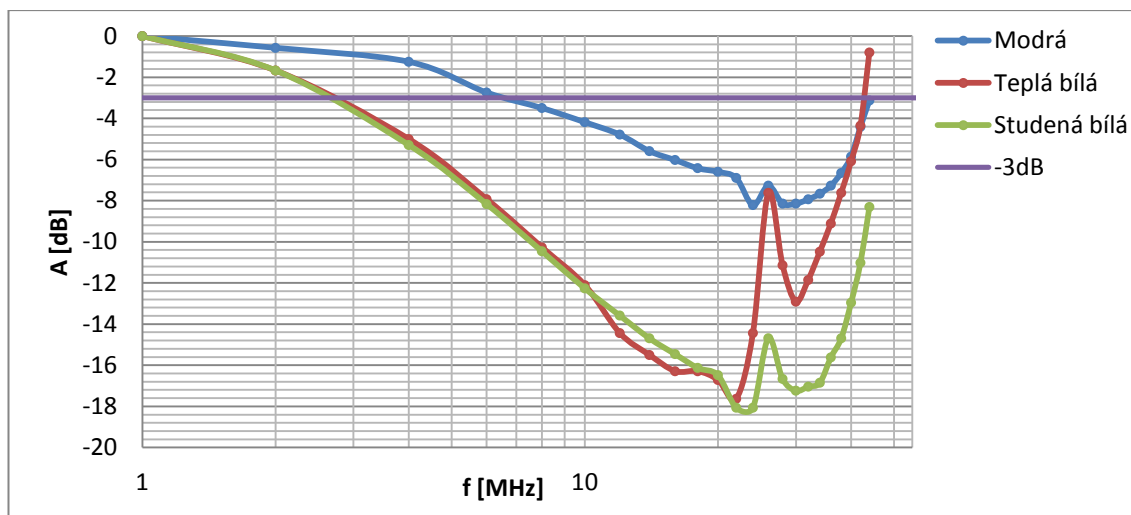


Obrázek 5.9: Frekvenční charakteristika optického výstupu Power TOPLED Plus.



Obrázek 5.10: Frekvenční charakteristika modulátoru s Advanced Power TOPLED.

Na obrázcích 5.9 a 5.11 je frekvenční charakteristika optického výstupu jednotlivé typy LED, je na nich vidět výrazný rozdíl mezi samotným modrým čipem a bílými LED, u kterých se pro přeměnu modrého světla na bílé využívá luminofor. Samotný modrý čip u Advanced Power TOPLED vykazoval pokles o 3 dB kolem 7 MHz a bílé LED využívající luminofor kole 2,8 MHz. LED typu Power TOPLED Plus vykazovaly jak u samotného modrého čipu tak u bílých led využívajících luminofor lepších výsledků. Modrý čip vykazoval pokles o 3 dB při 9,5 MHz a bílé led již při 3 MHz.



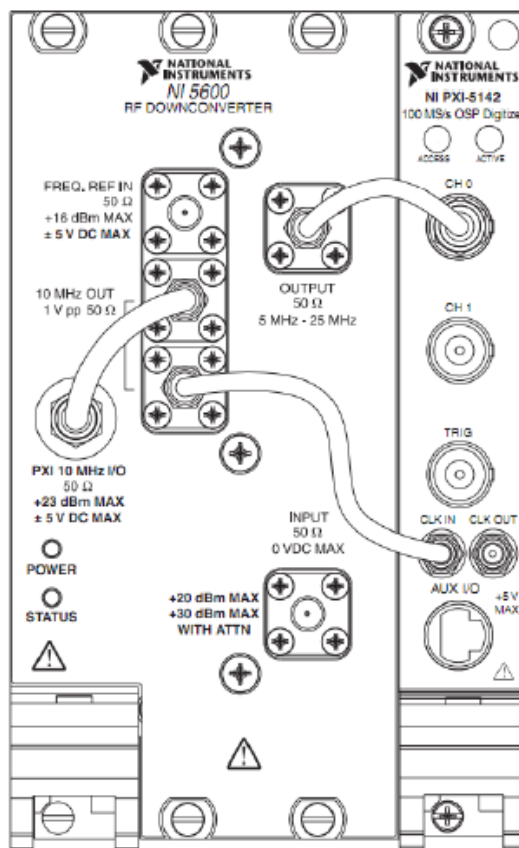
Obrázek 5.11: Frekvenční charakteristika optického výstupu Advanced Power TOPLED.

Frekvenční charakteristiky obvodů byly měřeny pomocí osciloskopu Lecroy 204xi, generátoru signálu RHODE & SCHWARZ SMB 100A a fotodektoru THORLABS PDA10A. Naměřené hodnoty jsou v elektronické podobě jako příloha na CD.

6 Optický přijímač

6.1 Signálový analyzátor RF VSA NI PXI-5661

Přijímač je rovněž složen ze dvou částí. Prvním modulem je downconverter (PXI-5600) a druhý je vysoko-rychlostní digitizér (PXI-5142). Downconverter pracuje v rozmezí 250 kHz – 2,7 GHz a zpracovává přijatý signál na IF (15 MHz). To umožňuje získat maximální šířku pásma 20 MHz, digitizér pracuje na maximální vzorkovací frekvenci 64 MS/s, a je vybaven digitálním downconverter čipem, který mohou provádět digitální downconverzi IF šířka pásma signálu je 1,25 MHz. Pokud je potřeba větší šířka pásma než je 1,25 MHz pak se downconverze provádí softwarově, která je výrazně pomalejší [9].



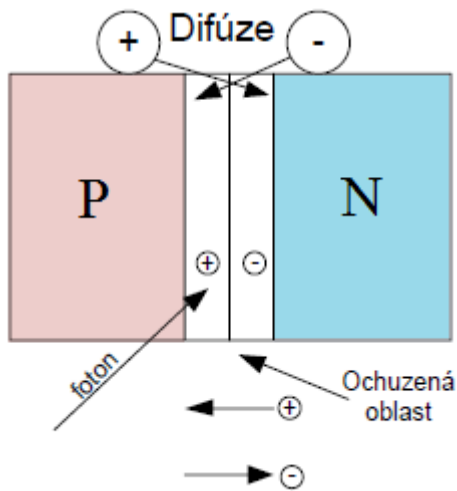
Obrázek 6.1: Zapojení analyzátoru NI PXI-5661 [9].

6.2 Fotodiody

Funkce je založena na přeměně fotonového toku nebo optického výkonu na elektrický proud. Fotodetektory můžeme rozdělit podle rychlosti a efektivity na tepelné detektory a fotoelektrické. U fotoelektrických dochází k pohlcení fotonů, a přechodu pohyblivých nosičů náboje na vyšší energetické hladiny. Působením elektrického pole dochází k přemísťování nosičů a vzniká elektrický proud.

Fotoelektrický jev lze rozdělit na vnitřní a vnější. Vnější fotoefekt způsobuje emisi elektronu mimo povrch látky, elektrony jsou emitovány katodou k anodě, kde jsou pohlcovány. Tímto principem je tvořen elektrický proud, který je přímo úměrný fotonovému toku. Tento jev je využíván u fotonek a fotonásobičů.

V optických komunikacích nalézá využití vnitřní fotoefekt, kde foto-excitované elektrony nebo díry zůstávají uvnitř materiálu. Spojením polovodiče typu P a N vznikne PN přechod s ochuzenou oblastí, ta se projevuje vznikem elektrického pole uvnitř této oblasti. Připojením napětí v závěrném směru diody, dojde k rozšíření ochuzené vrstvy. Pokud na diodu nepůsobí světelné záření, dochází k excitaci elektronů pouze vlivem tepelné energie. Osvětlením přechodu dochází k vybuzení nových elektronů, v případě že mají dostatečnou energii, překonají zakázaný pás a na svém místě zanechají díru [14],[15].

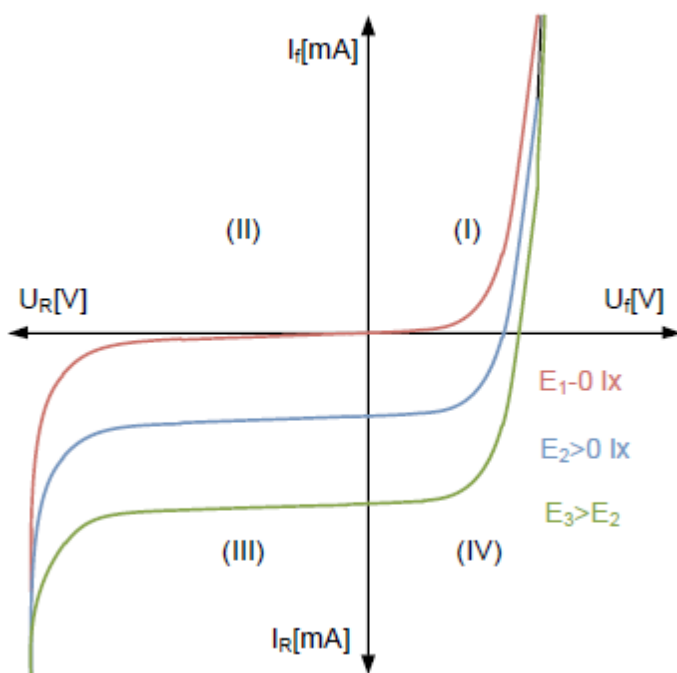


Obrázek 6.2: Princip funkce fotodiody

V-A charakteristika fotodiody

V neosvětleném stavu je charakteristika fotodiody podobná charakteristice usměrňovací diody. Při osvětlení přechodu se její charakteristika posouvá směrem k záporným proudům a neprochází nulou.

Z V-A charakteristiky fotodiody vyplývají dva režimy použití a to fotovoltaický a odporový režim. Ve fotovoltaickém režimu je využíváno vlastností čtvrtého kvadrantu, kdy se fotodioda chová jako zdroj elektrické energie. Výhodou tohoto režimu je minimální vznik šumů, tento děj je však pomalý a nehodí se pro komunikační účely. Vlastností třetího kvadrantu je využito v odporovém režimu fotodiody, při zvýšení intenzity osvětlení může fotodioda pracovat v odporovém režimu i ve čtvrtém kvadrantu. Na fotodiodu musí být přivedeno napětí v závěrném směru a tím je rozšířena ochuzená oblast. Generované volné elektrony driftují vyšší rychlostí ke katodě a díry k anodě, tím lze dosáhnout vyšších přenosových rychlostí.



Obrázek 6.3: V-A charakteristika fotodiody

Fotodioda PN

Je aktivní polovodičová součástka tvořená PN přechodem ve kterém probíhá fotoefekt. Fotony jsou absorbovány elektrony v ochuzené vrstvě a tím vznikají díry. Elektrony přecházejí do vodivostní vrstvy jen tam, kde existuje elektrické pole. Nosiče se mohou pohybovat jen určitým směrem, díky tomu vzniká elektrický proud uvnitř obvodu [14], [15].

Fotodiody PIN

Patří mezi nejpoužívanější typy fotodiod, je dostatečně rychlá má vysokou citlivost a náklady na výrobu jsou nízké. Struktura fotodiody PIN složena ze silně dotovaných vrstev typu N a P mezi nimiž se nachází slabě dotovaná vrstva I, tím je dosaženo rozšíření ochuzené vrstvy, na kterou dopadá světlo. Touto konstrukcí snížena kapacita přechodu fotodiody. Nevýhodou této konstrukce je prodloužení průletové doby elektronů ochuzenou vrstvou. Nejčastěji používaná materiál pro výrobu je křemík, nejvyšší citlivost vykazují tyto diody kolem 900 nm a s rostoucí vlnovou délkou jejich citlivost prudce klesá, při 650nm je citlivost PIN fotodiod zhruba poloviční.

Fotodiodu lze provozovat jak ve fotovoltaiickém tak ve fotovodivostním režimu. Pro komunikační účely se fotovoltaiický režim z důvodů pomalých reakcí nepoužívá. Nejběžnější zapojení fotodiody je ve fotovodistním režimu, kdy je v obvodu zapojena v závěrném směru. Velikost napájecího napětí se pohybuje v jednotkách až desítkách voltů. Proud fotodiodou je závislý na dopadající intenzitě světla i vlnové délce. Nejdůležitější charakteristikou fotodiod PIN je závislost citlivosti na vlnové délce. . Rozdělení PIN fotodiod podle použitého materiálu je uveden v tab. 6.1.

Tabulka 6.1: Parametry fotodiod [16].

Materiál	Temné proudy	Rychlost	Citlivost na vlnové délky [nm]
Křemík (Si)	Malé	vysoká	400 – 1000
Gemanium (Ge)	Velké	nízká	150 – 550
Galium Posfor (GaP)	Malé	vysoká	800 – 1800
Indium Galium Arsenid (InGaAs)	Malé	vysoká	800 – 1800
Indium Arsenid Antimonide (InAsSb)	Velké	nízká	1000 - 5800
Indium Galium Arsenid s rozšířeným rozsahem (InGaAs)	Velké	Vysoká	1200 – 2600

Kapacita přechodu PIN fotodiod je přímo úměrná velikosti aktivní oblasti a nepřímo úměrná velikosti napětí v závěrném směru. Kapacita PIN fotodiod se pohybuje v řádech pF v závislosti na velikosti aktivní plochy. S rostoucí modulační rychlostí se zvětšuje minimální detekovatelný výkon. [14], [15].

Lavinová fotodioda APD

Použitím velkého závěrného napětí u fotodiody APD dochází ke zvětšení zisku. Použité napětí urychluje nosiče náboje a jejich energie stačí k vybuzení dalších nosičů, tím vzniká lavinový efekt. Z jednoho nosiče vznikne lavina nosičů vytvářející proud fotodiodou, to usnadňuje detekovat slabé optické signály. Při lavinovém efektu vzniká ve fotodiodě šum, který lze omezit konstrukcí APD. Využívá se zde závěrného napětí až stovek voltů, čímž je docíleno zesílení proudu fotodiodou až 100x. Zesílení je závislé na velikosti závěrného napětí a teplotě. APD dosahuje zisku až 100 mA/μW [14], [15].

Šum a minimální detekovatelná intenzita

Detektory v bezvláknových optických komunikacích jsou vystavovány mnoha rušivých vlivů, které obsahují stejnosměrnou tak i střídavou složku rušení. Zdrojem těchto rušení je okolní parazitní světlo, ze zdrojů jako je slunce, měsíc, osvětlení, nebo případně modulované rozptýlené světlo z jiného optického vysílače. Okolní parazitní světlo vede ke snížení citlivosti fotodetektoru. Minimální detekovatelný signál v ideálních podmínkách (s nulovým okolního rušení) musí mít minimálně 0,1 nW. V reálných podmínkách by měl mít 10x větší amplitudu než šumu, tedy minimální odstup signálu od šumu musí být 20 dB [14], [15].

6.3 Fotodetektor v transimpedančním zapojení

Pro konstrukci fotodetektoru bylo vybíráno z nízko šumových operačních zesilovačů s velkou šířkou pásma vysokou rychlostí přeběhu. Bylo vybíráno z řady operačních zesilovačů OPA84X od Texas Instruments, které jsou pro tyto účely navrženy. S nejlepšími parametry byl vybrán operační zesilovač OPA847 a pro následné zesílení detekovaného signálu je použit OPA846. Základní parametry operačních zesilovačů jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Tabulka 6.2: Základní vlastnost použitých operačních zesilovačů.

	OPA846	OPA847
GBP [MHz]	1750	3900
Rychlost přeběhu [V/μs]	625	950
Šířka pásma [MHz]	500	600

Fotodioda pro navrhovaný fotodetektor byla vybírána s ohledem na velikost aktivní plochy a spektrální citlivosti. Požadovaným parametrům vyhovovala velkoplošná fotodioda FSD1010. Parametry fotodiody jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tabulka 6.3: Parametry FSD1010.

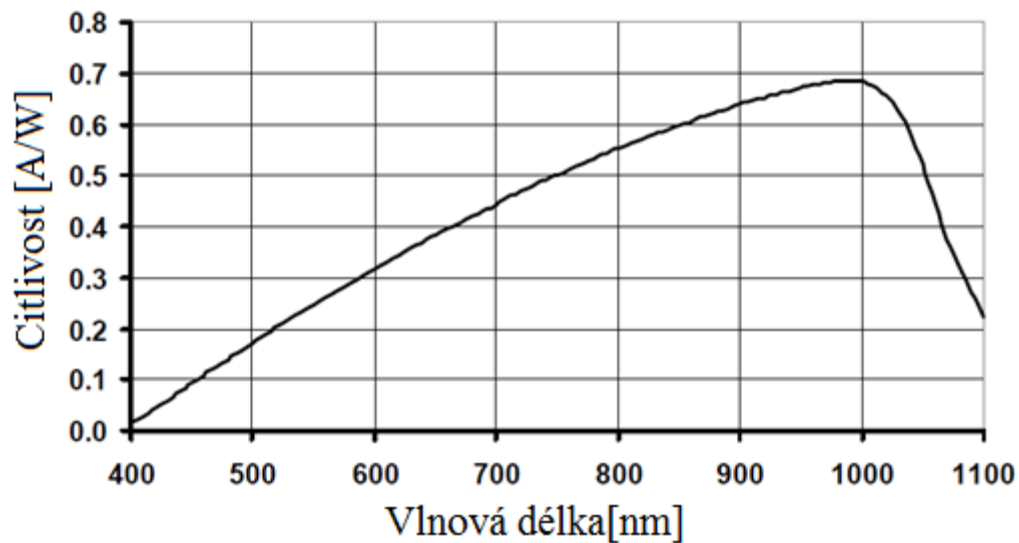
Spektrální citlivost [nm]	400-1100
Aktivní plocha [mm ²]	94
Náběžný/sestupný čas ($R_L=50 \Omega$, 5 V) [ns]	45/45
Temný proud [nA] (5V)	600
Kapacita [pF] (5 V)	375
Maximální závěrné napětí [V]	25

Ve vzdálenosti 30 cm od zdroje signálu byl naměřen výkon 0,11 mW. Pro námi využívané spektrum má fotodioda citlivost kolem 0,25 A/W. Výstupní proud a napětí je vypočte na dle vzorce(). Schéma zapojení je fotodetektoru je obr.6.4 .

$$I_d = R(\lambda) \cdot P = 0,25 \cdot 0,11 = 0,0275 \text{ mA.} \quad (6.1)$$

$$U_o = I_d \cdot R_1 = 0,0275 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 = 55 \text{ mV.} \quad (6.2)$$

$$f_{-3dB} = \sqrt{\frac{GBP}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_D}} = \sqrt{\frac{3900 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 2000 \cdot 375 \cdot 10^{-12}}} = 28,768 \text{ MHz.} \quad (6.3)$$



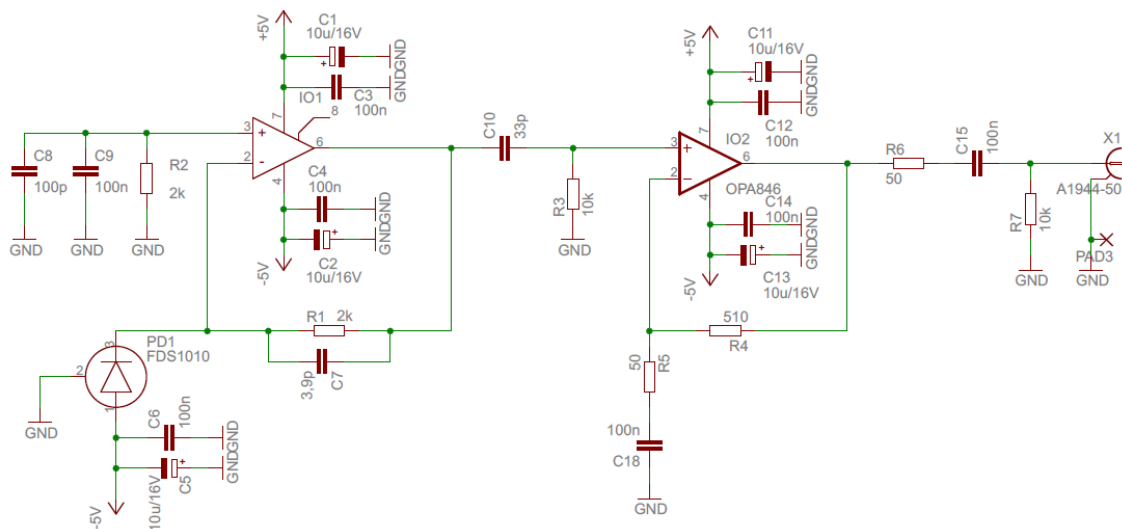
Obrázek 6.4: spektrální charakteristika fotodiody FSD1010

Z důvodu velké kapacity fotodiody, je nutné v obvodu provést její kompenzaci, která se provádí pomocí kondenzátoru připojeného paralelně k odporu R_1 (viz. obr.6.4). Hodnota kompenzačního kondenzátoru je vypočtena dle vzorce (6.4). Vypočtená hodnota 3,9 pF je v SMD provedení k dostání.

$$C_F = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot \sqrt{\frac{GBP}{4\pi \cdot R_1 \cdot C_D}}} \quad (6.4)$$

$$C_F = \frac{1}{2\pi \cdot 2000 \cdot \sqrt{\frac{3900 \cdot 10^6}{4\pi \cdot 2000 \cdot 375 \cdot 10^{-12}}}} = 3,91 \text{ pF}.$$

N a neinvertujícím vstupu operačního zesilovače v transimpedačním zapojení, jsou pro minimalizaci vstupního šumu zapojeny C8,C9 hodnoty jsou doporučeny výrobcem a R2 jehož hodnota je rovna R1.



Obrázek 6.5: Schéma zapojení fotodetektoru

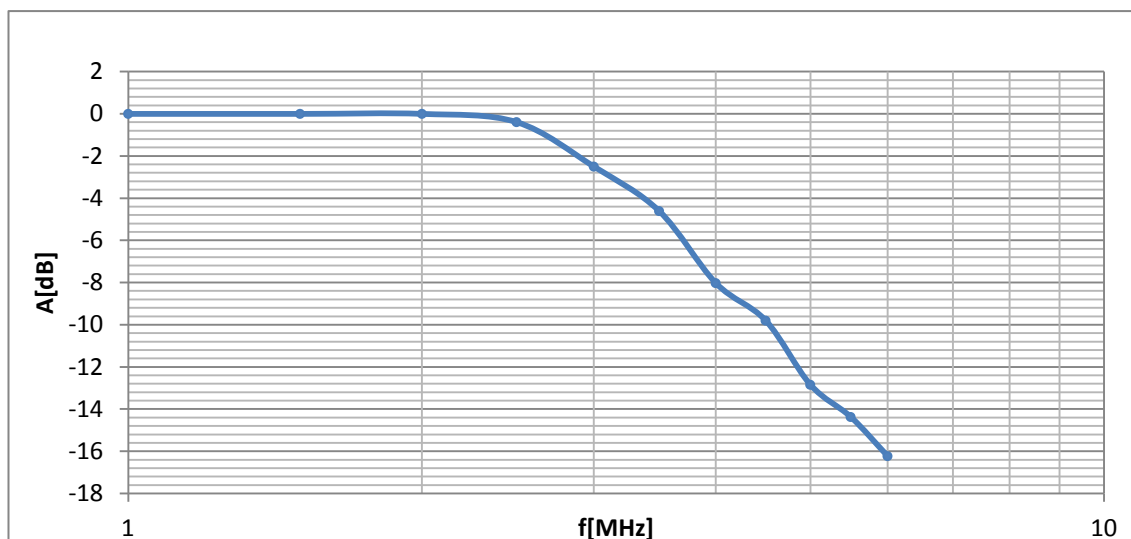
Za transimpedančním zapojením následuje zesilovací stupeň, který přijatý signál zesílí. Zesílení pro střídavé signály je určeno pomocí rezistorů R4 a R5 dle vzorce (6.5).

$$A_u = 1 + \frac{R4}{R5} = 1 + \frac{510}{50} = 11,2. \quad (6.5)$$

Pro stejnosměrný signál je zesílení $A_u = 1$, to je určeno kondenzátorem C18 zapojeným mezi rezistor R5 a zem. Přijímací obvod je napájen symetrickým napájecím napětím ± 5 V.

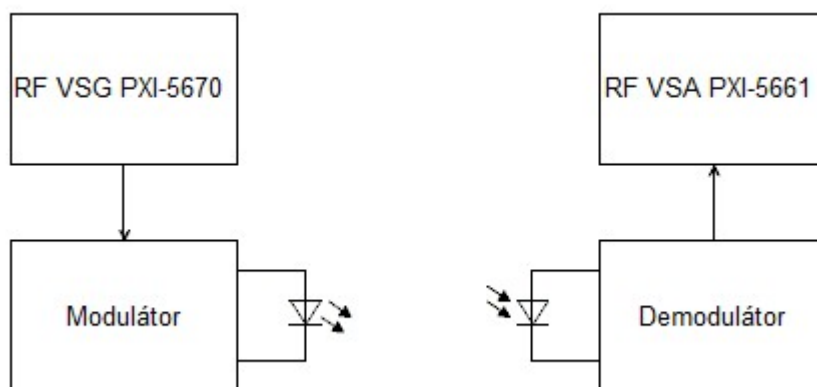
7 Měření modulací a jejich vyhodnocení

Na vytvořeném optickém bezvláknovém spoji vytvořeném z modulátoru V.1 a optického přijímače prezentovaného v této práci bylo provedeno měření frekvenční charakteristiky tohoto spoje(obr.7.1).



Obrázek 7.1: Frekvenční charakteristika optického bezvláknového spoje.

Po oživení a proměření vlastností modulátoru a demodulátoru byla provedena měření s využitím vektorového generátoru RF VSG NI PXI-5670 a analyzátoru RF VSA NI PXI-5661. Zapojení měřeného optického spoje je na obr.7.2.

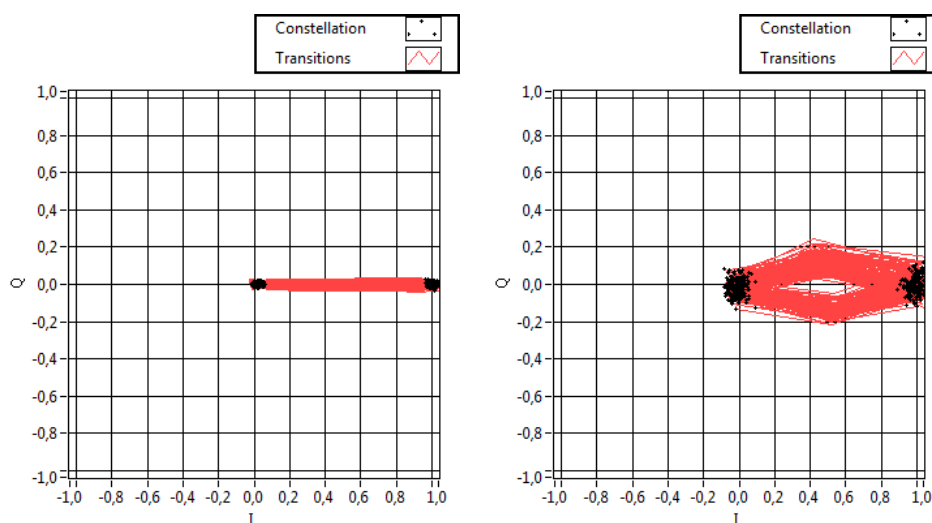


Obrázek 7.2: Vytvořený optický bezvláknový spoj.

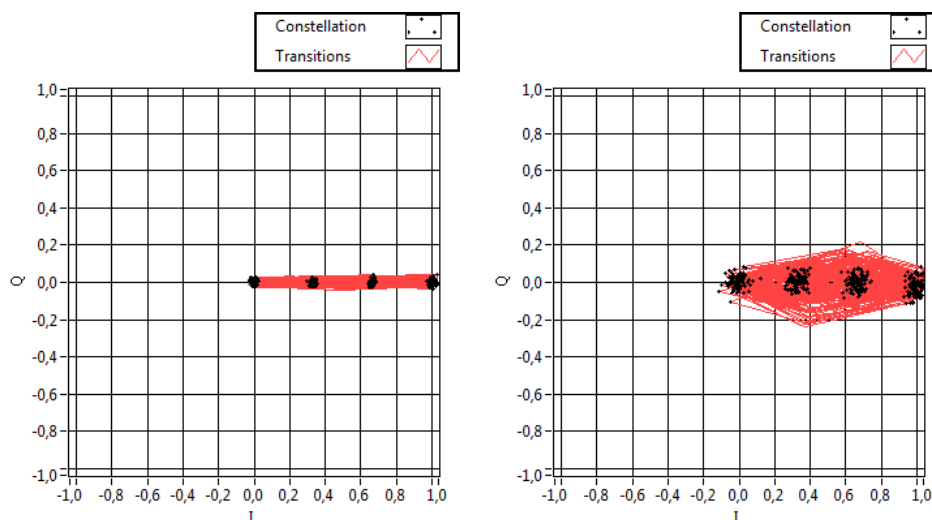
7.1 ASK

Měření všech modulací M-ASK bylo realizováno s nosnou vlnou o frekvenci 2 MHz, tato frekvence byla odvozena od změřených parametrů vysílačů kapitola 5.2. Každá modulace byla změřena ve vzdálenosti vysílače a přijímače 15cm a 30cm. Modulace byly měřeny pro symbolovou rychlost 100 kHz, 500 kHz a 800 kHz. V průběhu měření byly zaznamenávány vektorové diagramy a parametry modulací. V diplomové práci jsou prezentovány vektorové diagramy jednotlivých M-ASK modulací pro symbolovou rychlost 100 kHz a pro nejvyšší dosažitelnou rychlost.

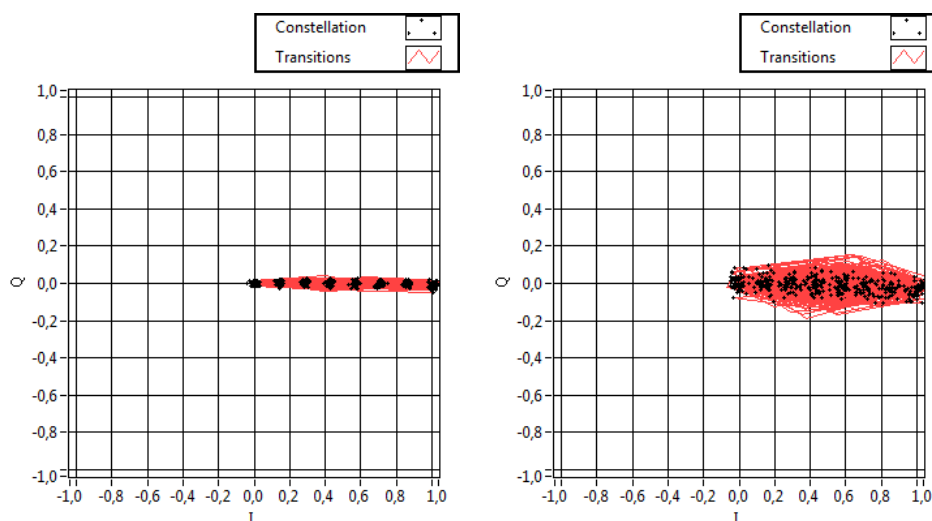
7.1.1 Výsledky měření pro vzdálenost 15 cm



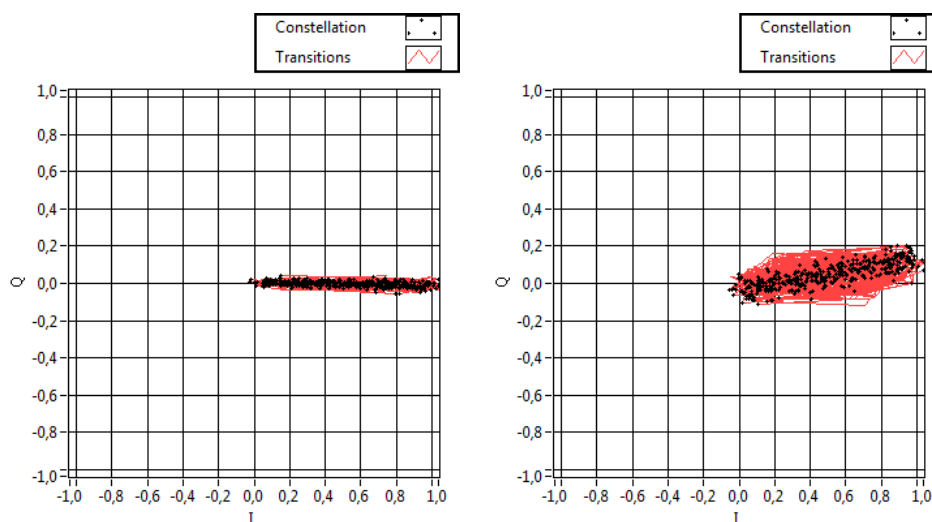
Obrázek 7.3: Vektorový diagram 2-ASK pro symbolovou rychlost 100 kHz a 800 kHz.



Obrázek 7.4: Vektorový diagram 4-ASK pro symbolovou rychlost 100 kHz a 800 kHz.



Obrázek 7.5: Vektorový diagram 8-ASK pro symbolovou rychlost 100 kHz a 800 kHz.



Obrázek 7.6: Vektorový diagram 16-ASK pro symbolovou rychlost 100 kHz a 800 kHz.

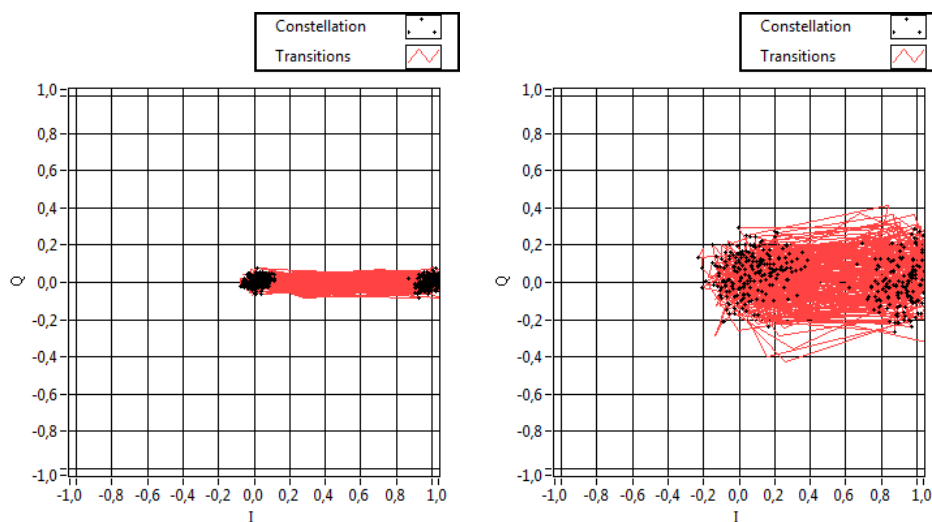
Na obr. 7.4 je vidět, že pro symbolovou rychlost 800 kHz jednotlivé stavy modulace začínají splývat a nebude možné jednotlivé stavy 8-ASK modulace jednoznačně rozpoznat. Z obrázku 7.5 je zřejmé že, 16-ASK je pro použití na tomto spoji z důvodu úplného splnutí stavů nepoužitelná.

Z tabulky 7.1 vyplývá že tímto měření bylo dosaženo na vzdálenost 15 cm přenosové rychlosti 2400 kbit/s při pohledu na vektorový diagram 8-ASK modulace (obr.7.6) je vidět že jednotlivé stavy modulace začínají splývat a docházelo by k velké chybovosti.

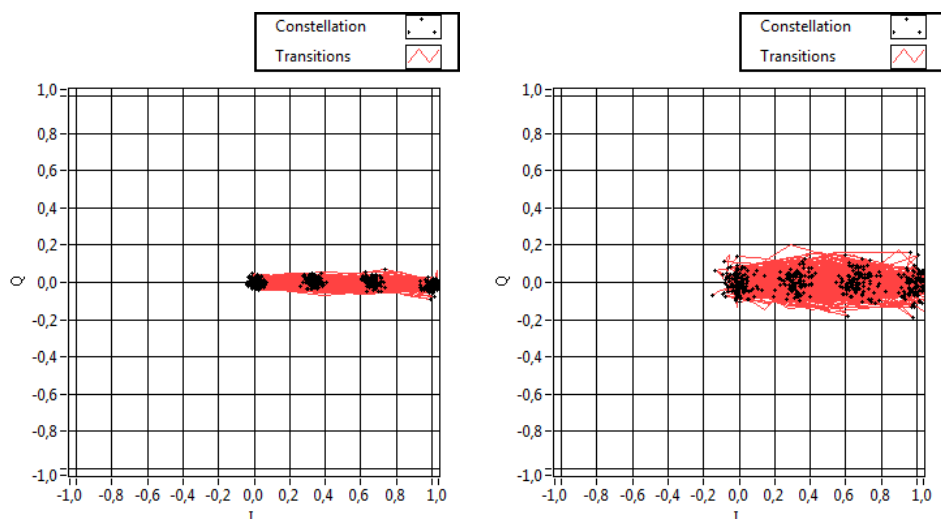
Tabulka 7.1: Parametry M-ASK modulací pro vzdálenost 15 cm.

Symbolová rychlost[kHz]	M-ASK	MER[dB]	EVM	Přenosová rychlost [kbit/s]
100	2	36,42	1,07	100
	4	30,53	1,84	200
	8	31,22	1,66	300
	16	31,75	1,51	-
500	2	23,92	4,59	500
	4	24,15	3,9	1000
	8	24,27	3,66	1500
	16	23,98	3,68	-
800	2	22,07	5,55	800
	4	22,68	4,57	1600
	8	22,53	4,47	2400
	16	-1,41	72,74	-

7.1.2 Výsledky měření pro vzdálenost 30 cm



Obrázek 7.7: Vektorový diagram 2-ASK pro symbolovou rychlost 100 kHz a 800 kHz.



Obrázek 7.8: Vektorový diagram 4-ASK pro symbolovou rychlost 100 kHz a 500 kHz.

Tabulka 7.2: Parametry M-ASK modulací pro vzdálenost 30 cm.

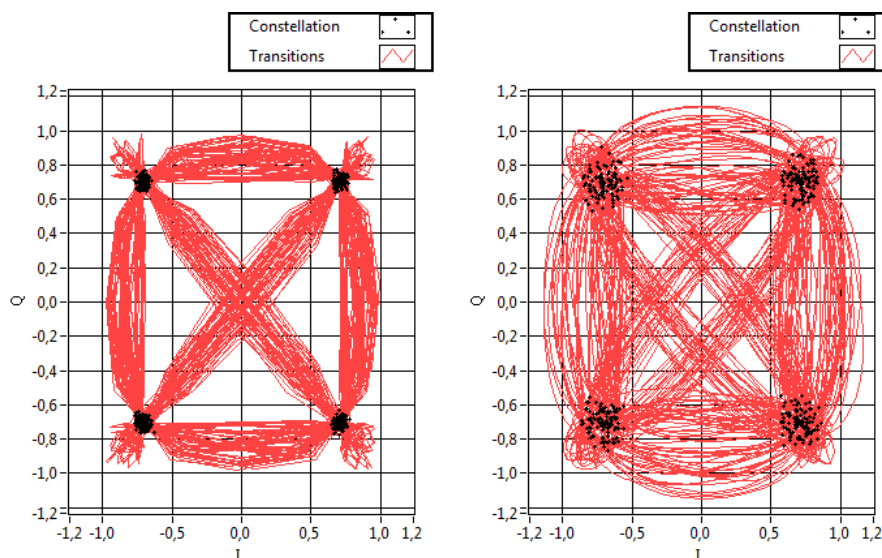
Symbolová rychlost[kHz]	M-ASK	MER[dB]	EVM	Přenosová rychlost [kbit/s]
100	2	18,42	8,63	100
	4	24,88	3,57	200
	8	21,31	5,16	-
500	2	16,78	10,35	500
	4	17,98	7,91	1000
	8	17,04	8,43	-
800	2	12,03	17,54	800
	4	13,6	13,2	-

Při měření M-ASK modulací pro vzdálenost 30 cm bylo dosaženo přenosové rychlosti 1000 kbit/s. Vektorový diagram pro tuto hodnotu 4-ASK modulace jeví známky zvětšení rozptylu stavů modulace, ale nedochází zde k jejich splývání.

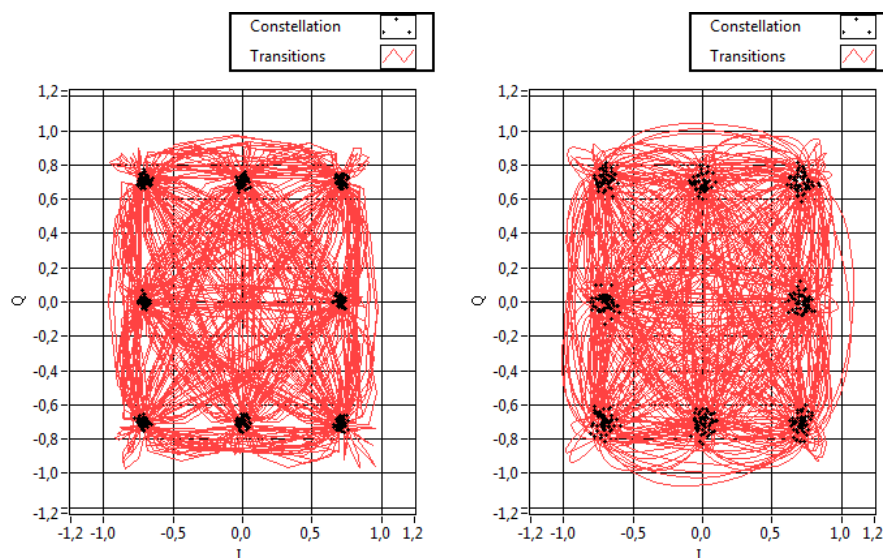
7.2 QAM

Měření u QAM modulací probíhalo obdobně jako u ASK modulací, použita byla opět nosná vlna o frekvenci 2 MHz. Byly použity vzdálenosti vysílače a přijímače 15cm a 30cm. Modulace byly měřeny pro symbolovou rychlost 100 kHz, 500 kHz a 700 kHz. V průběhu měření byly zaznamenávány vektorové diagramy a parametry modulací. V diplomové práci jsou prezentovány jako v předchozím případě vektorové diagramy jednotlivých M-QAM modulací pro symbolovou rychlost 100 kHz a pro nejvyšší dosažitelnou rychlost pro danou vzdálenost.

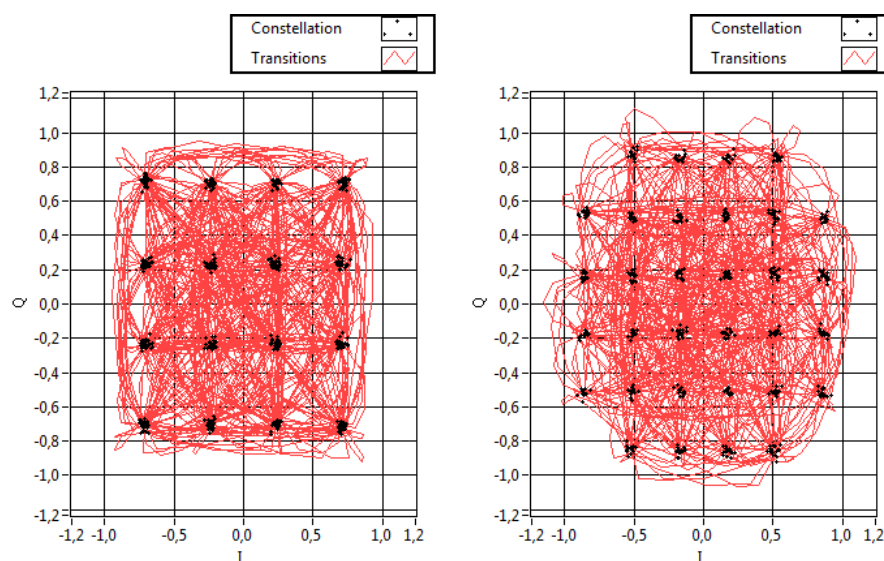
7.2.1 Výsledky měření pro vzdálenost 15cm



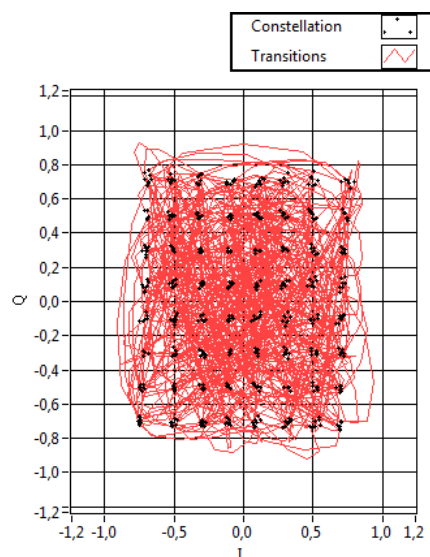
Obrázek 7.9: Vektorový diagram 4-QAM pro symbolovou rychlost 100 kHz a 700 kHz.



Obrázek 7.10: Vektorový diagram 8-QAM pro symbolovou rychlost 100 kHz a 500 kHz.



Obrázek 7.11: Vektorový diagram 16-QAM a 32-QAM pro symbolovou rychlost 100 kHz.



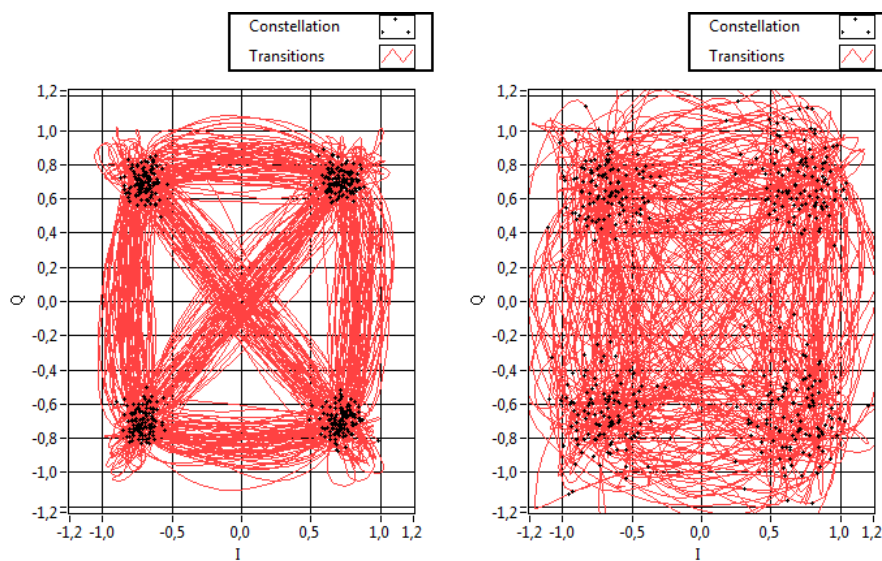
Obrázek 7.12: Vektorový diagram 64-QAM pro symbolovou rychlost 100 kHz.

U M-QAM modulací bylo dosaženo na vzdálenost 15 cm přenosové rychlosti 1500 kbit/s. Z vektorového diagramu (obr. 7.10) je vidět že stavy 8-QAM pro symbolovou rychlost 500 kHz vykazují větší rozptyl oproti 8-QAM pro 100 kHz, tomuto faktu odpovídá i změna hodnot EVM a MER.

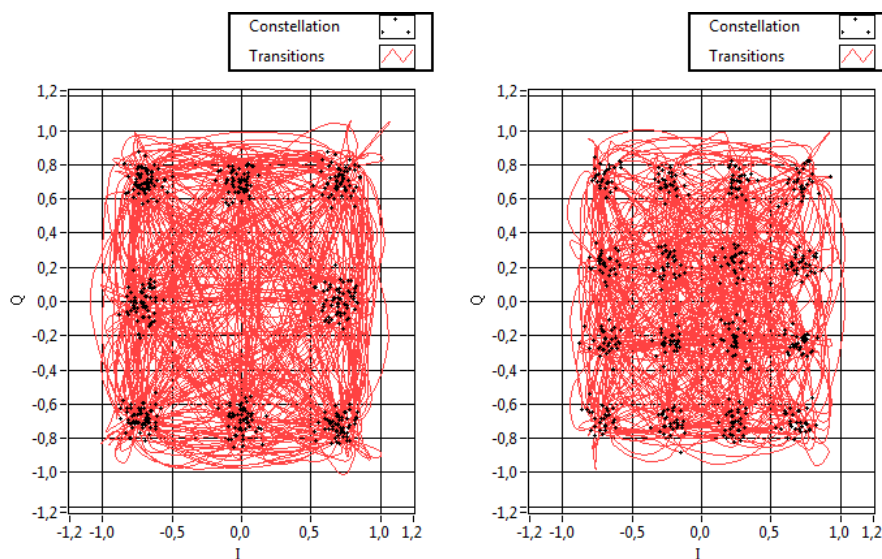
Tabulka 7.3: Parametry M-QAM modulací pro vzdálenost 15 cm.

Symbolová rychlost[kHz]	M-QAM	MER[dB]	EVM	Přenosová rychlost [kbit/s]
100	4	28,42	3,79	200
	8	28,46	3,28	300
	16	28,19	2,91	400
	32	28,37	2,94	500
	64	27,9	2,63	600
	128	-2,36	80,1	-
500	4	23,13	6,97	1000
	8	22,8	6,27	1500
	16	-2,79	102,27	-
700	4	20,22	9,75	1400
	8	-4,13	141,49	-

7.2.2 Výsledky měření pro vzdálenost 30cm



Obrázek 7.13: Vektorový diagram 4-QAM pro symbolovou rychlost 100 kHz a 700 kHz.



Obrázek 7.14: Vektorový diagram 8-QAM a 16-QAM pro symbolovou rychlost 100 kHz.

Tabulka 7.4: Parametry M-QAM modulací pro vzdálenost 30 cm.

Symbolová rychlost[kHz]	M-QAM	MER[dB]	EVM	Přenosová rychlost [kbit/s]
100	4	20,09	9,89	200
	8	18,31	10,56	300
	16	18,51	8,85	400
	32	-2,93	107,44	-
500	4	13,11	22,1	1000
	8	-2,36	114,12	-
700	4	11,47	26,7	1400
	8	-1,06	98,77	-

Na 30 cm bylo pomocí 4-QAM dosaženo přenosové rychlosti 1400 kbit/s. Z vektorového diagramu modulace(obr.7.13) je vidět že stavy modulace vykazují značné rozptýlení, kterému odpovídají i změny hodnot MER a EVM.

8 Závěr

První část této práce je zaměřena na návrh a konstrukci optického vysílače kde jsou použity jako zdroj signálu bílé LED. Návrh vysílače obnášel seznámit se s bezvláknovými optickými komunikacemi a vektorovým generátorem a digitálními modulačními formáty.

Při měření vlastností zkonstruovaného modulátoru bylo zjištěno, že dynamické vlastnosti bílých LED využívající modrý čip a luminofor pro přeměnu modrého světla na bílé dosahují přibližně třetinových parametrů, než vykazuje samotný modrý čip. Tento aspekt velmi omezuje použití bílých LED této konstrukce pro vysokorychlostní komunikace. Možným řešením tohoto problému by bylo použití bílých LED konstrukce RGB. Další alternativou je použití modrého filtru na straně přijímače kde se ale dostáváme spektrálně do oblasti nižší citlivosti PIN fotodiod.

Vlastnosti demodulátoru byly měřeny pouze v kombinaci modulátorem a to z toho důvodu že v danou chvíli nebyl žádný modulovatelný zdroj potřebných parametrů k dispozici. Výsledná optický bezvláknová spoj disponuje šířkou pásma kolem 3,2 MHz.

Možností jak zväšit šířku přenášeného pásma

Na vytvořeném bezvláknovém optickém spoji bylo dosaženo maximální přenosové rychlosti 2400 kbit/s na vzdálenost 15 cm s využitím modulace 8-ASK, a na stejnou vzdálenost bylo dosaženo s modulací 8-QAM rychlosti 1500 kbit/s. Oproti tomu na vzdálenost 30 cm bylo dosaženo s využitím 4-QAM modulace přenosové rychlosti 1400 kbit/s a na stejnou vzdálenost použitím 4-ASK modulace rychlosti 1000 kbit/s.

Pro optické bezvláknové spoje jsou z hlediska odolnosti proti rušení vhodnější modulace M-QAM kde při modulaci dochází ke změně fáze i amplitudy.

Použitá literatura

- [1] TANAKA, Yuichi, Toshihiko KOMINE, Shinichiro HARUYAMA a Masao NAKAGAWA. Indoor Visible Light Data Transmission System Utilizing White LED Lights. *IEICE transactions on communications*. 2003, E86-B, č. 8, s. 2440-2454. ISSN 0916-8516.
- [2] GFELLER, F. R. a U. BAPST. Wireless in-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation. *Proceedings of the IEEE*. 1979, 67, č. 11, s. 1474-1486. ISSN 0018-9219.
- [3] KAHN, Joseph M. a John R. BARRY. Wireless Infrared Communications. *Proceedings of the IEEE*. 1997, roč. 85, č. 2, s. 265-298. ISSN 0018-9219. IEEE 802.15.7. *Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*. New York, USA: IEEE Computer Society, 2011
- [4] IEEE 802.15.7. *Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*. New York, USA: IEEE Computer Society, 2011.
- [5] MOREIRA, Adriano J.C., Rui T. VALADAS a A. M. DE OLIVEIRA DUARTE. *Wireless Networks*. roč. 3, č. 2, s. 131-140. ISSN 10220038. DOI: 10.1023/A:1019140814049. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/openurl.asp?id=doi:10.1023/A:1019140814049>
- [6] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000, 656 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [7] Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM) [online]. s. 3 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3652/en>.
- [8] LM7171 Very High Speed, High Output Current, Voltage Feedback Amplifier [online]. SNOS760B–MAY 1999–REVISED MARCH 2013 Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm7171.pdf>
- [9] ANALÝZA DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ S VYUŽITÍM HARDWAROVÉ PLATFORMY V PODOBĚ PXI VEKTOR SIGNÁLOVÉHO ANALYZÁTORU A KNIHOVNÍCH FUNKCÍ Z DOPLŇKOVÉ KNIHOVNY MODULATION TOOLKIT. MARTÍNEK, Radek. VŠB - TUO. Měření v informačních a komunikačních technologiích [online]. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/martinekradek/teaching>
- [10] ŽÍDEK, Jan. Digitální modulace. Ostrava, 2010. Výukový materiál. VŠB - TUO.
- [11] HAUSKE, Maximilian a Friedrich K. JONDRAL. Characterization of wireless optical indoor channels. In: *Photonics Global Conference (PGC), 2010*. Singapore, 2010, s. 1-5. ISBN 978-1-4244-9882-6.

-
- [12] GENEROVÁNÍ DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ S VYUŽITÍM MODULÁRNÍHO SYSTÉMU HARDWAROVÉ PLATFORMY V PODOBĚ PXI VEKTOR SIGNÁLOVÉHO GENERÁTORU A KNIHOVNÍCH FUNKCÍ Z DOPLŇKOVÉ KNIHOVNY MODULATION TOOLKIT. MARTÍNEK, Radek. VŠB - TUO. Měření v informačních a komunikačních technologiích [online]. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/martinekradek/teaching>
- [13] Chyby diskretních modulací. In: HOREVAJ, Michal. [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://horevaj.com/horevaj/11_files/5.pdf
- [14] DAVID, A. a P.E JOHNSON. Handbook of Optical Through the Air Communications [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.imagineeringezine.com/ttaoc-pdf/OTTAC-Handbook.PDF>
- [15] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 80-730-0184-5.
- [16] Transimpedance Amplified Photodetectors. Photodiode Tutorial [online]. 2014 [cit. 2014-05-1]. Dostupné z: http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=4

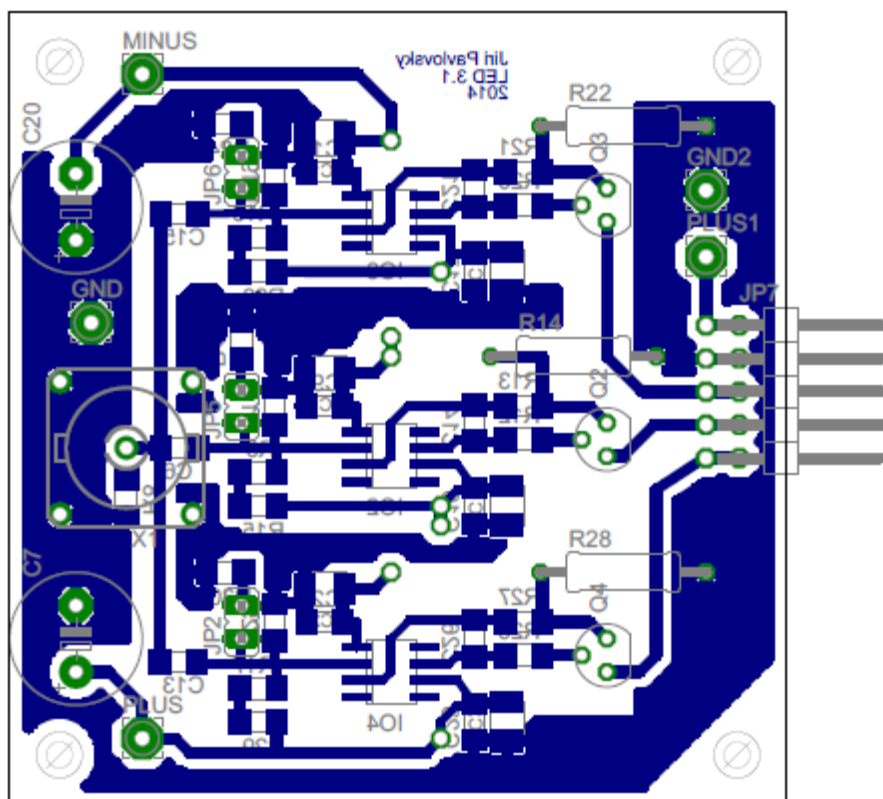
Seznam příloh

Příloha.A: Modulátor V2 xlv

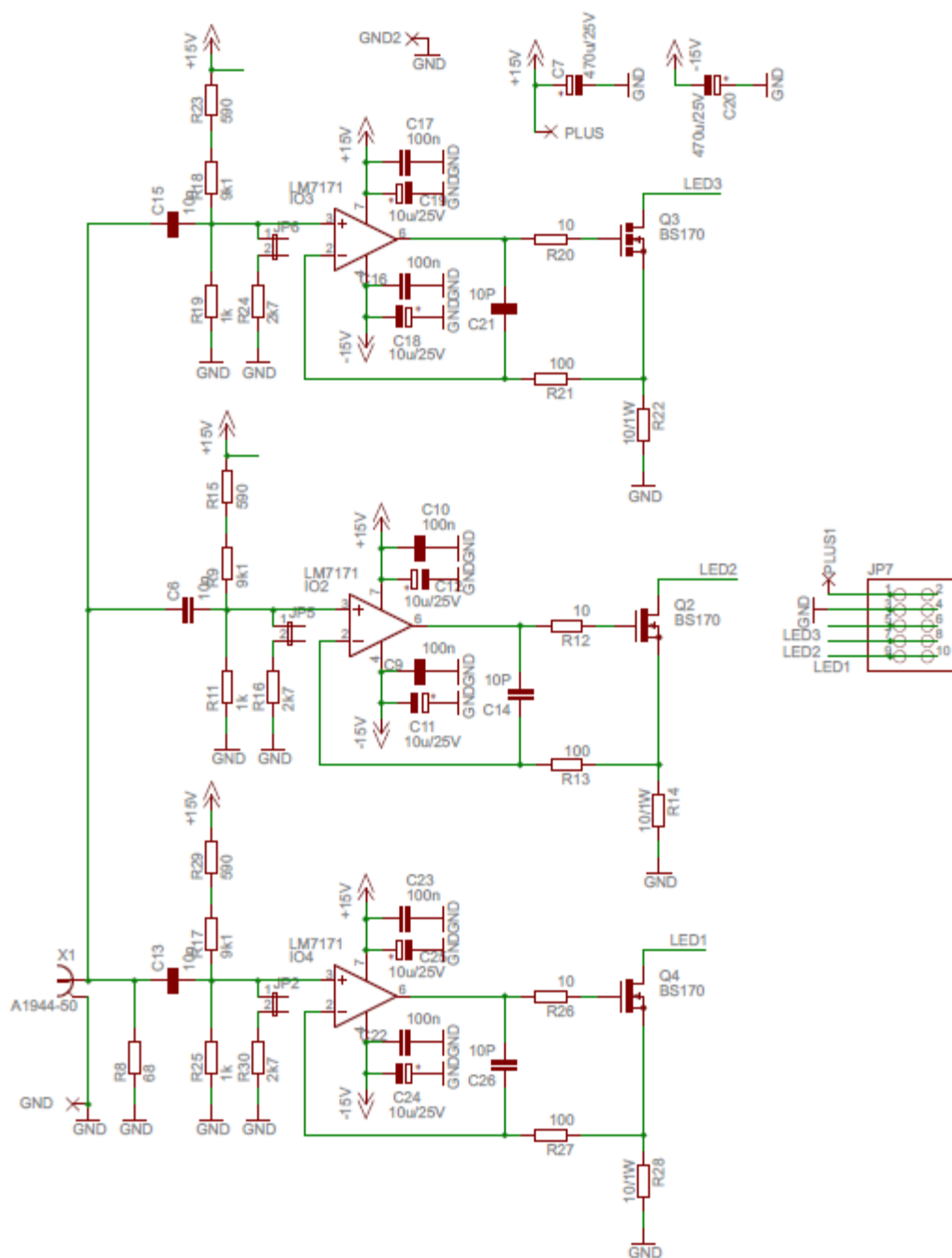
Součástí DP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

/Soubory_eagle/	Návrhy obvodů v Eaglu
/ tabulky_f_ch /	Tabulky s naměřenými hodnotami frekvenčních charakteristik
/Vektorove_diagramy/	Všechny vektorové diagramy



Obrázek 8.1: Deska plošných spojů Modulátoru V2



Obrázek 8.2: zapojení celého modulátoru.

